

UNIVERZITA KARLOVA

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. David Černický

**VYUŽITÍ TVARU DOPRAVNÍ SÍTĚ V HODNOCENÍ
DOSTUPNOSTI SLUŽEB**

**USE OF THE SHAPE OF THE TRANSPORT NETWORK FOR
EVALUATION OF THE SERVICE ACCESSIBILITY**

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. RNDr. Přemysl Štych, Ph.D.

Praha 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 14. 8. 2020

.....

David Černický

Děkuji svému vedoucímu práce panu doc. RNDr. Přemyslu Štychovi, Ph. D. za trpělivou pomoc při psaní této diplomové práce a za užitečné odborné připomínky. Rovněž bych také chtěl poděkovat své rodině za neutuchající podporu a v neposlední řadě bych rád také poděkoval své přítelkyni, přátelům, spolubydlícím, své kočce, a kolegům a štamgastům z Mrtvé Ryby, kteří mi pomáhali ve chvílích nejtěžších a poskytli mi důležitý odpočinek a odreagování od práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá faktory ovlivňující průměrnou průjezdní rychlost na českých silnicích. Mezi hlavní faktory, které ovlivňují průměrnou rychlost, byly vybrány křivolakost a sklonitost svahů. Tyto faktory byly doposud posuzovány v diskrétních intervalech, nikoliv jako spojité funkce. Funkce pro výpočet křivolakosti vychází z ČSN 73 6101, kde je přímo definována rovnice se všemi proměnnými. Funkční vztah pro pohyb vozidel ve svažitých terénech byl vytvořen z dat vědeckých článků. Proto byl v této práci implementován algoritmus, který dokáže automaticky ohodnotit průměrné průjezdní rychlosti na silniční síti. Pro implementaci tohoto algoritmu byl použit jazyk Python.

Dále je v práci provedeno testování dojezdových časů, které je validováno pomocí route plannerů a také podpořeno rozsáhlým terénním šetřením. Testování probíhalo v prostředí GIS pomocí metod síťové analýzy. Testování ukázalo, že zahrnutí křivolakosti a sklonitosti výrazně zlepší výpočet dojezdových časů.

klíčová slova: síťová analýza, křivolakost, gis, algoritmus

Abstract

This thesis deals with factors influencing the average speed on Czech roads. Curvature and inclination of the slopes were selected among the main factors influencing the average speed. Until now, these factors have been considered at discrete intervals, not as continuous functions. The function for calculating the curvature is based on ČSN 73 6101, where the equation with all variables is directly defined. The functional relationship for the movement of vehicles in sloping terrain was created from data from scientific articles. Therefore, an algorithm was implemented in this thesis, which can automatically evaluate the average speed on the road network. Python was used to implement this algorithm.

Furthermore, there is a testing section for travel times, which is validated using route planners and also supported by extensive field research. Testing took place in GIS using network analysis methods. Testing has shown that the inclusion of curvature and inclination will significantly improve the calculation of travel times.

key words: network analyst, curvature, gis, algorithm

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Odborná rešerše	10
2.1. Teorie grafů.....	10
2.2. Graf	10
2.3. Síťová analýza	12
2.3.1. Grafové algoritmy	12
2.3.2. Výpočet cesty a Dijkstrův algoritmus	12
2.3.3. Lokace/alokace zdrojů.....	13
2.4. Silniční síť jako vektorová vrstva	14
2.5. Rychlost	14
2.6. Faktory ovlivňující rychlost na komunikacích	15
2.6.1. Typ silnice	16
2.6.2. Sklon komunikace	17
2.6.3. Inravilán vs. extravilán	19
2.6.4. Intenzita provozu	19
2.6.5. Stav komunikace a opravy	20
2.6.6. Nehodovost.....	20
2.7. Poloměry směrových oblouků	21
2.8. Deviatilita a křivolakost.....	21
2.8.1. Deviatilita	21
2.8.2. Křivolakost	23
2.9. Současný stav zkoumané problematiky	23
3. Použitá data	25
3.1. Silniční síť.....	26
3.2. Digitální model terénu	28
4. Metodika	29
4.1. Použitý software	29
4.2. Stanovení průjezdových rychlostí.....	29
4.3. Využití digitálního modelu terénu	33
4.4. Příprava dat pro testování	34
4.4.1. Příprava silniční sítě	34
4.4.2. Příprava digitálního modelu terénu.....	34
4.5. Python	35
4.6. Funkcionalita kódu	35
4.6.1. Použité knihovny a proměnné	36
4.6.2. Minimální parametry vstupních dat.....	36
4.6.3. Úprava liniové vrstvy	37

4.6.4.	Dělení linií	38
4.6.5.	Vytvoření atributů	40
4.6.6.	Přidání hodnoty rychlostí	41
4.6.7.	Výpočet času	43
4.7.	Tvorba nástroje	43
4.8.	Tvorba network datasetu	44
4.9.	Zájmové území	45
5.	Výsledky	47
5.1.	Testovací trasy	47
5.1.1.	Trasa A	48
5.1.2.	Trasa B	49
5.1.3.	Trasa C	50
5.1.4.	Trasa D	51
5.1.5.	Trasa E	52
5.1.6.	Trasa F	53
5.1.7.	Trasa G	54
5.1.8.	Trasa H	55
5.2.	Souhrn výsledků	56
6.	Diskuse.....	58
6.1.	Validace průjezdních rychlostí	58
6.1.1.	Porovnání výsledků	59
6.2.	Funkčnost skriptu	60
7.	Závěr.....	61
8.	Zdroje	62
8.1.	Literární zdroje	62
8.2.	Zdroje dat	65
9.	Přílohy	66

Seznam obrázků

Obr. č. 1: Sedm mostů města Královce	10
Obr. č. 2: Příklad grafu.....	11
Obr. č. 3: Linie a vertexy.....	14
Obr. č. 4: Faktory ovlivňující průměrnou rychlost na silnicích (Hudeček (2008)).....	16
Obr. č. 5: Příčný sklon komunikace (Pavlíček, Radimský 2011).....	17
Obr. č. 6: Rychlost ve vztahu ke sklonu vozovky (vybrané rychlosti).....	18
Obr. č. 7: Hodnocení deviatility	22
Obr. č. 8: Porovnání OSM - červeně, ZABAGED - zeleně, ArcČR500 – modře	25
Obr. č. 9: Výpočet křivolakosti pomocí kosinové věty	30
Obr. č. 10: Příklad	31
Obr. č. 11: Kružnice pro výpočet mezní rychlosti	32
Obr. č. 12: Vliv funkce Interpolate shape na vertexy linií	33
Obr. č. 13: Dílčí část silnice	37
Obr. č. 14: Parametry nástroje na ohodnocení vektorů	44
Obr. č. 15: Náhled nástroje v prostředí ArcGIS Pro	44
Obr. č. 16: Nastavení času dle směru	45
Obr. č. 17: Náhled zájmového území.....	46
Obr. č. 18: Náhled trasy A.....	48
Obr. č. 19: Náhled trasy B.....	49
Obr. č. 20: Náhled trasy C.....	50
Obr. č. 21: Náhled trasy D.....	51
Obr. č. 22: Náhled trasy E.....	52
Obr. č. 23: Náhled trasy F	53
Obr. č. 24: Náhled trasy G.....	54
Obr. č. 25: Náhled trasy H.....	55
Obr. č. 26: Náhled tras pro sekundární testování	59
Obr. č. 27: Dělicí body na linii.....	60

Seznam tabulek

Tab. č. 1: Vybrané typy síťové analýzy	13
Tab. č. 2: Mezní poloměry ve vztahu k rychlosti (pro dostředivý sklon 2,5 %) (ČSN 73 6101).....	15
Tab. č. 3: Neměnné a proměnlivé faktory	16
Tab. č. 4: Návrhové rychlosti dle sklonu a typu komunikace (ČSN 736101 2004 a Louthan 2010) – pouze výběr	18
Tab. č. 5: Výsledky měření v intravilánu (Černický 2018).....	19
Tab. č. 6: Navržené rychlosti pro vrstvu silniční sítě	30
Tab. č. 7: Trasy určené pro testování	47
Tab. č. 8: Složení trasy A	48
Tab. č. 9: Výsledky měření trasy A.....	48
Tab. č. 10: Složení trasy B	49
Tab. č. 11: Výsledky měření trasy B.....	49
Tab. č. 12: Složení trasy C	50
Tab. č. 13: Výsledky měření trasy C	50
Tab. č. 14: Složení trasy D	51
Tab. č. 15: Výsledky měření trasy D.....	51
Tab. č. 16: Složení trasy E.....	52
Tab. č. 17: Výsledky měření trasy E	52
Tab. č. 18: Složení trasy F.....	53
Tab. č. 19: Výsledky měření trasy F	53
Tab. č. 20: Složení trasy G	54
Tab. č. 21: Výsledky měření trasy G.....	54
Tab. č. 22: Výsledky měření trasy H.....	55
Tab. č. 23: Souhrnné výsledky	56
Tab. č. 24: Souhrn výsledků na trase H.....	57
Tab. č. 25: Souhrn výsledků sekundárního testování.....	57
Tab. č. 26: Výsledky sekundárního testování.....	59

Seznam příloh

Příloha č. 1: Záznam měření trasy A.....	66
Příloha č. 2: Výškový profil trasy A	66
Příloha č. 3: Záznam měření trasy B	66
Příloha č. 4: Výškový profil trasy B.....	66
Příloha č. 5: Záznam měření trasy C	67
Příloha č. 6: Výškový profil trasy C.....	67
Příloha č. 7: Záznam měření trasy D.....	67
Příloha č. 8: Výškový profil trasy D	67
Příloha č. 9: Záznam měření trasy E	68
Příloha č. 10: Výškový profil trasy E.....	68
Příloha č. 11: Záznam měření trasy F	68
Příloha č. 12: Výškový profil trasy F	68
Příloha č. 13: Záznam měření trasy G.....	69
Příloha č. 14: Výškový profil trasy G	69
Příloha č. 15: Záznam měření trasy H – směr nahoru	70
Příloha č. 16: Záznam měření trasy H – směr dolů	71
Příloha č. 17: Výškový profil trasy H	71

1. Úvod

Záměrem této práce je optimalizace nastavení parametrů síťové analýzy a i samotné sítě, na které se bude tato analýza provádět. Vychází se z předpisů českých státních norem, které definují rychlost v různých částech komunikace.

Tato práce navazuje na bakalářskou práci (Černický 2018). Motivací pro pokračování byly nepřesnosti ve výpočtu času na dlouhé vzdálenosti. Rychlosti, které byly stanoveny ve zmíněné bakalářské práci, vycházeli z odborné literatury. Po provedení analýzy však bylo zjištěno, že tyto rychlosti již neplatí. Problémem bylo především jednotné určení rychlosti pro celou kategorii silnic.

Myšlenka je tedy taková, že ke každé silnici by se mělo přistupovat individuálně, co se týče navržení průměrné průjezdní rychlosti. Rychlost vozidla a jeho rychlost v zatáčkách se váže na platné fyzikální zákony, jako jsou hybnost vozidla, odstředivá síla, dostředivá síla gravitační zrychlení atd. A celý tento proces se tomu podrobuje.

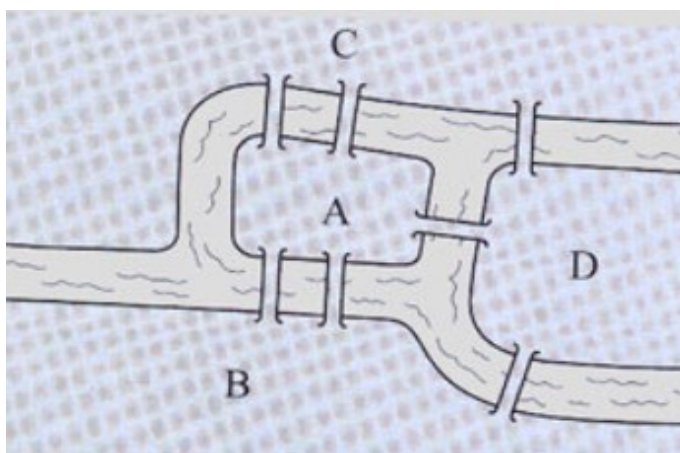
Cílem práce je vytvoření algoritmu, který je schopen počítat zakřivení zatáček a přiřazovat těmto úsekům průjezdní rychlost, která odpovídá poloměru zatáčky. Tento kritický poloměr je definován v ČSN 73 6101, kde je definována rovnice, která tyto fyzikální jevy popisuje. Díky této rovnici je možné za standardních podmínek určit, jaká by mohla být průjezdní rychlost jakoukoliv zatáčkou. Do algoritmu též vstupuje vliv reliéfu, který má rovněž vliv na rychlost vozidel na silnicích. Při cestě do kopce auto zrychluje nebo jede pomaleji než na rovině či z kopce. Tyto parametry mají mít vliv především u silnic nižších tříd, které byly projektovány dávno, před dnes platnými normami.

Celý algoritmu je zakomponován do funkčního nástroje pro ArcGIS Pro, je tak zpřístupněn široké škále uživatelů. V rámci práce je prováděno testování a validace výstupů algoritmu.

2. Odborná rešerše

2.1. Teorie grafů

Matematické základy síťové analýzy vycházejí z teorie grafů, která se zabývá řešením problémů, které lze řešit právě pomocí grafu (Rapant 2002). Za zakladatele tohoto oboru matematiky je považován Leonhard Euler, který se v roce 1736 řešil úlohu Sedmi mostů města Královce (viz. Obr. č. 1). Zadání úlohy znělo, zda je možné projít každým mostem ve městě právě jednou a vrátit se zpět do původního místa. Euler jako první dokázal, že to nelze.



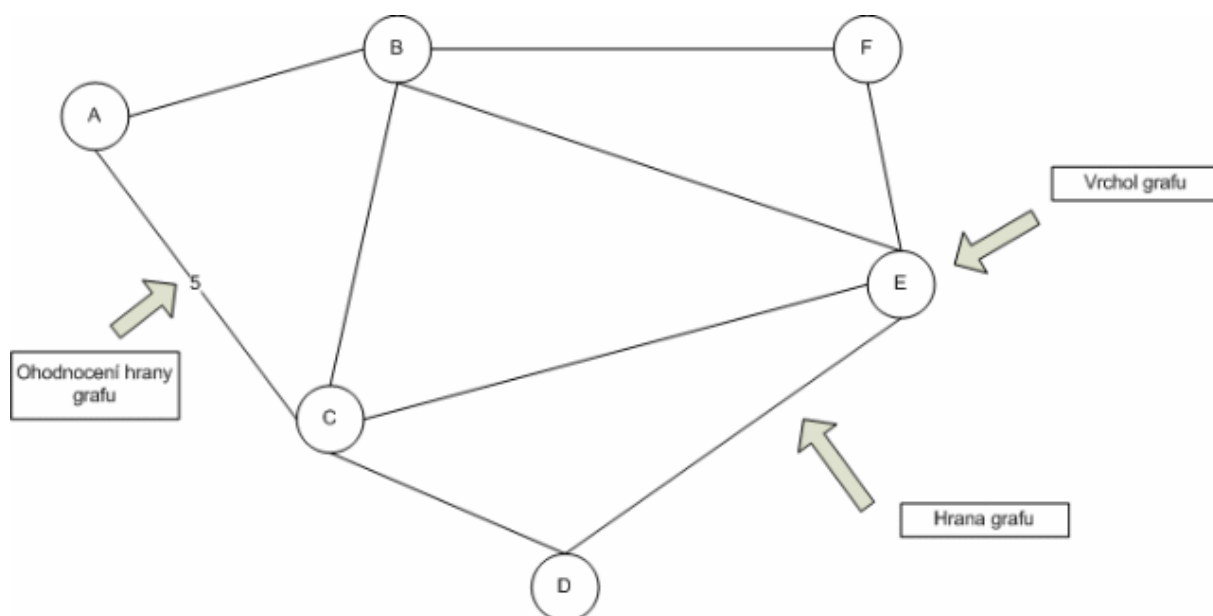
Obr. č. 1: Sedm mostů města Královce

Teorie grafů byla rovněž nápomocna v kartografii, kde se dlouho nepodařilo dokázat, zda je možné mapu obarvit pouze čtyřmi barvami, aniž by se dva sousedící státy v barvě shodovali. První zmínka o problému se datuje do roku 1840. Roku 1890 britský matematik Alfred Bray Kempe dokázal, že k obarvení mapy bohatě stačí pět barev. Až roku 1976 se podařilo matematicky dokázat, že stačí opravdu jen čtyři barvy (Šišma 1997). Celý důkaz včetně obrázků má 170 stran.

2.2. Graf

Obecný graf G se skládá ze tří základních prvků. Mezi tyto prvky patří množina všech vrcholů V , množina všech hran H a ε je *zobrazení incidence*, což určuje, za jsou dva libovolné vrcholy spojeny hranou, či nikoliv (Šeda 2003). Grafy se dají dělit do několika kategorií. Jednou z nich je *konečnost* grafů. Pokud má graf konečný počet vrcholů, jedná se o graf *konečný*, pokud je počet jeho vrcholů nekonečný je graf označován jako graf *nekonečný* (Havel 1955). Silniční síť, která bude využita pro analýzu, bude mít konečný počet vrcholů, tudíž se bude o konečný graf.

Výpočet dostupnosti je definován především hranami. Hranu lze orientovat a přiřadit jí hodnotu. Pod orientací hrany grafu si lze představit jednosměrku. Hrana tedy propouští pouze jedním směrem. Ohodnocením hrany může být numerická hodnota, definující náklady na překonání této hrany (vzdálenost, čas, obtížnost) (Šeda 2003). V případě sítě pro analýzu se bude jednat o *orientovaný hranově ohodnocený graf*. Ohodnocen může být i vrchol. Uzlově ohodnocený graf se může v reálném případě využít, třeba jako křižovatka, kde se definuje čas zdržení v tomto uzlu (Peňáz 2006).



Obr. č. 2: Příklad grafu

Jednou ze základních vlastností grafu je tvorba *cesty*, která vznikne propojením dvou libovolných vrcholů (uzlů) (Rapant 2002). Rapant (2002) cestu definuje jako posloupnost orientovaných hran s tím, že následující hrana začíná ve vrcholu, ve kterém ta předchozí hrana skončila. Pokud se *cesta* na konci octne ve stejném uzlu, jako začala, jedná se o cyklus. Bez přiřazení orientace hranám, vytvoříme *řetězec*.

Pro práci s grafy ve virtuálním prostředí je třeba, aby splňovaly určité podmínky. Pokud graf tyto podmínky splňuje, je označován jako *síť*. Síť musí mít ohodnocené všechny hrany nezápornou hodnotou (případně i uzly), musí být souvislá (z každého uzlu grafu existuje řetězec k ostatním uzlům), hrany grafu musí být orientovány (Rapant 2002). Silniční síť, která je použita pro tuto práci, splňuje všechny tyto podmínky. Pomocí nástrojů GIS, lze vyřešit následující problémy. Například: problém obchodního cestujícího, cesta o nejmenších nákladech, areál obslužnosti a jiné. K řešení těchto problémů využívají nástroje nejrůznější algoritmy.

2.3. Síťová analýza

Síť, která je tvořena uzly a ohodnocenými hranami, může představovat model reálného světa, v tomto případě silniční síť. K analýze je potřeba mít vhodný software, který dokáže počítat dle našich požadavků a síť případně upravovat dle potřeb. Základem síťových analýz je hledání cesty.

2.3.1. Grafové algoritmy

Grafy mohou sloužit k nejrůznějším účelům. Kromě hledání cesty se rovněž mohou použít při stavbě potrubí, kde se využívají při hledání maximálního toku v síti nebo při stavbě elektrické sítě, kde se využívají pro hledání nejmenší kostry.

Pro optimalizaci toku v síti ať už ta síť představuje cokoli, se využívá orientovaný graf. Vrcholy, kde tok vzniká, se nazývají zdroje, a kde naopak zanikají, se nazývají stoky (Valla, Matoušek 2008). Hraný jsou ohodnoceny maximální kapacitou, kterou jsou schopny pojmout. Typickým představitelem tohoto algoritmu je Fordův–Fulkersonův algoritmus. Tento algoritmus přiřadí na začátku všem grafům hodnotu nula. Následně pak prohází graf a testuje nalezení zlepšující cesty. Pokud takovou cestu najde, tok se zvýší, pokud nikoliv, tak už k žádnému zvýšení průtoku nedojde (Černý 2010). Pro rychlejší výpočet maximálního toku sítě lze využít rovněž Dinicův algoritmus (Černý 2010).

Další skupinou algoritmů je skupina hledající minimální kostru grafu. Minimální kostrou se rozumí minimální součet hodnot všech hran pro propojení všech vrcholů. Průkopníkem v této oblasti byl český matematik Otakar Borůvka, který řešil stavbu elektro-vodních sítí na jižní Moravě (Borůvka 1926). Každý vrchol se spojí s vrcholem, k němuž má nejlevnější cestu. Po vytvoření polygonálních tahů se stejným způsobem spojují již vytvořené polygonální tahy, dokud nejsou všechny vrcholy spojeny (Milková 2000).

Barvení grafu rovněž probíhá pomocí algoritmu, jak již bylo zmíněno. V jeho nejjednodušší formě, to je způsob barvení vrcholů grafu takový, že žádné dva sousední vrcholy jsou stejné barvy (West 1996). Toto se nazývá „vertex coloring“. Podobně funguje i barvení hran, algoritmus přiřazuje každé hraně barvu tak, aby žádné dvě sousední hrany neměly stejnou barvu

2.3.2. Výpočet cesty a Dijkstrův algoritmus

Výpočet trasy v síti se hledá mezi dvěma zvolenými body (Velhartický 2007). Výsledkem tohoto výpočtu je cesta pokud se pohybujeme z bodu *A* do bodu *B* a nebo okruh pokud je startovní bod totožný s cílovým. Pro správný výpočet je třeba mít síť topologicky přesnou, To

znamená, že všechny uzly jsou správně napojeny na sousední hrany nebo naopak nejsou, například u mimoúrovňových křižovatek nebo přemostění. Dále, že hrany jsou nezáporně ohodnoceny popřípadě nastavena jednosměrnost hrany.

Síťová analýza je schopna řešit velké množství úloh. Od nejjednoduššího hledání nejlevnější cesty, přes problém obchodního cestujícího, po areály obslužnosti (viz. Tab. č. 1).

Analýza	Popis
nejlevnější cesta	Funkce využívaná v každé navigaci, pro nejrychlejší/nejkratší/nejlevnější přesun. Využíváno rovněž složkami integrovaného záchranného systému.
problém obchodního cestujícího	Funkce využívána především doručovacími firmami. Tato funkce dokáže propojit množinu bodů na síti nejlevnější možnou cestou.
areál obslužnosti	Funkce využívána například při řešení dojezdnosti záchranné služby, kde se stanoví areál, odkud je to do zařízení nejbližší.

Tab. č. 1: Vybrané typy síťové analýzy

Pro výpočet zmíněných analýz se využívají zavedené algoritmy. Dijkstrův algoritmus se využívá k nalezení nejkratší cesty mezi dvěma body. Algoritmus byl objeven nizozemským informatikem Edsgerem Wybem Dijkstrou. Jedná se tedy o algoritmus konečný. Ve skutečnosti nalezne nejkratší cestu do všech uzlů v síti (Dial 1969). Algoritmus sám o sobě neukáže cestu, pouze přidělí bodům hodnotu, se kterou je možné je nejlevněji dosáhnout. Lze ho však snadno upravit, aby tuto cestu našel a to tak, že si u každého vrcholu v okamžiku změny ohodnocení zapamatuje, z kterého uzlu se to tohoto uzlu dostal. U posledního bodu lze pak zjistit, ze kterého bodu se sem algoritmus dostal, z předposledního období a takto až ke startu (Kráľ, Mareš, Škoda 2013).

První krok algoritmu se nazývá inicializace, kdy se vytvoří množina všech vrcholů, včetně vrcholu počátečního. Druhý krok nazývaný relaxace je krok, při kterém se bodům, které jsou spojeny hranou, přiřadí hodnota hrany, se kterou jsou body k počátku propojeny. Následně se vybere ten s nejnižší hodnotou a začíná se znovu, přičemž pokud se znovu dostaneme do nějakého vrcholu, který je ohodnocen, může mu být přepsána hodnota, pokud je tato hodnota menší (Šeda 2003).

2.3.3. Lokace/alokace zdrojů

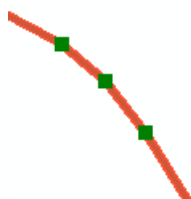
Pomocí síťové analýzy lze rovněž hledat ideální lokaci pro nejrůznější zařízení. V reálném světě je jedná o místa s nabídkou služeb, jako jsou obchodní centra, školky,

zdravotnická zařízení benzínové pumpy atd. (lokace). V opačném případě tvoření areálů spádovosti k nejbližším zařízením (alokace) (Peňáz 2006). Výsledkem úlohy je tedy alokování hran grafu příslušící k jednotlivým zařízením.

2.4. Silniční síť jako vektorová vrstva

V GIS se silnice mohou zobrazovat několika způsoby. Nejzákladnějším je rasterová podoba, která třeba v podobě ortofotomapy poskytuje vizuální informace (šířka, stav vozovky...). Funkčnost tohoto rasteru je však značně omezena a provádět na takové vrstvě analýzu dostupnosti, je zcela nevhodné. Jakákoliv funkce šíření (*Spatial analyst*) ztrácí v kontextu „linií“ smysl.

Pro dostupnostní analýzu je důležitá přesná délka silnice. Tuto informaci je možno získat z vektorových dat. Vektorová data jsou souborem geometrických prvků, které reprezentují reálný svět a dělí se na bod, linii a polygon. Přičemž linie, která v tomto případě reprezentuje silnice v síť, je souborem uspořádaných dvojic souřadnic x, y . Tyto body představují její zlomové body (vertexy). Vertexem je myšlen bod, ve kterém se linie láme (mění směr) (viz. Obr. č. 3) (QGIS 2020). Jedná se rovněž o uzel, na který se může připojit další linie (např. křižovatka).



Obr. č. 3: Linie a vertexy

Aby linie zachovala reálnou délku, bylo by zapotřebí nekonečné množství vertexů v zatáčkách. Toho je možné dosáhnout pomocí nástrojů „Arc“, které umí vytvořit křivky mezi třemi body. Různé zdroje dat mají různě rozpoložené vertexy a používají i jinou metodu zápisu dat, tím pádem mají různé délky linií.

2.5. Rychlost

Rychlost na pozemních komunikacích se řídí českou státní normou, která definuje soubor pravidel, která by měla být při výstavbě dodržována. ČSN 736101 definuje návrhovou rychlost a donedávna také směrodatnou rychlost na komunikacích.

Návrhová rychlost v_n je určována dle hospodářského a dopravního významu komunikace (typ silnice) a vlastností terénu v dané oblasti (rovina, hory). Jedná se tedy o smluvní rychlost, o které lze tvrdit, že na vozovce bude splněna přijatelná míra bezpečnosti provozu. Na ucelených dálničních tazích by tato rychlost měla být jednotná. Pokud se v návrhovém úseku komunikace vyskytne prvek, který nevyhovuje na návrhovou rychlost (směrový/výškový oblouk), přičemž zbytek úseku návrhové rychlosti vyhovuje, návrhová rychlost se v tomto místě nesnižuje. Na tento nevyhovující prvek se pouze upozorní dopravním značením. Návrhová rychlost v_n není v míněna jako rychlost, kterou se bude vozidlo pohybovat po vozovce (Holcner 2005).

Směrodatná rychlost v_s byla očekávaná rychlost automobilu, kterou umožňovaly technické parametry vozovky a nepřekračovalo jí 85 % ničím neomezených řidičů. Měnila se v závislosti na geometrii osy silnice, která je charakterizována jako již zmíněná křivolakost. Bývala větší nebo stejná jako návrhová rychlost a více se blížila skutečné rychlosti vozidel na vozovce. Směrodatná rychlost byla revizí ČSN 736101 zrušena a nahradila ji nová veličina mezní rychlost.

Mezní rychlost v_m , také dosažitelná rychlost, nahrazuje směrodatnou rychlost v_s . Z měření výzkumného projektu TAČR č. TA02030548 vyplývá, že směrové oblouky vozidla projíždějí výrazně vyšší rychlostí, než jaká odpovídá nejmenším dovoleným poloměrům směrových oblouků. Mezní rychlost v_m je definována v normě ČSN 73 6102 a je zavedena i v ČSN 73 6101 (Radimský, Matuszková 2016). V tabulce č. 2 jsou vybrané mezní poloměry k určité rychlosti.

Rychlost [km/h]	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30
Mezní poloměr [m]	485	415	350	290	235	185	145	105	75	40	30

Tab. č. 2: Mezní poloměry ve vztahu k rychlosti (pro dostředivý sklon 2,5 %) (ČSN 73 6101)

2.6. Faktory ovlivňující rychlost na komunikacích

Definování průjezdních rychlostí na komunikacích je složitá věc podléhající mnoha faktorům. Dle Hudečka (2008) jich je celkem 10 (viz. Obr. č. 4). Hudeček však mezi nimi neuvádí příčný sklon komunikace, který v prudších zatáčkách umožňuje rychlejší průjezd, uvádí pouze podélný. Hudeček rovněž definuje 4 předpoklady, které jsou nezbytné pro fungování takového modelu. Mezi tyto předpoklady patří dodržování zákonem definované maximální povolené rychlosti, absence jakýchkoliv zastávek během cesty (tankování, odpočinek, atd.), konstantnost silničního provozu, tedy dodržení jakéhosi průměru a takzvaná presumpce dobrého omylu při stanovení rychlosti. To znamená, že u nižších rychlostí dochází k většímu časovému omylu, než u rychlostí vyšších. Tento předpoklad se netýká silnic vyšších

tříd. Nutností pro správný návrh trasy je soulad směrového a výškového řešení (Pavlíček, Radimský 2011).



Obr. č. 4: Faktory ovlivňující průměrnou rychlost na silnicích (Hudeček (2008))

Faktory ovlivňující rychlost na komunikacích lze rozdělit na neměnné a proměnlivé (viz. Tab. č. 3). Neměnné faktor lze snadněji zahrnout do výpočtu. Pro použití proměnlivých faktorů je zapotřebí dlouhodobé sledování a analýza provozu na jednotlivých úsecích cest. Tento algoritmus již začaly používat některé aplikace pro výpočet nejkratší trasy.

Faktor	Neměnné/proměnlivé
typ silnice	neměnný
šířka silnice	neměnný
podélný/příčný sklon komunikace	neměnný
intravilán/extravilán	neměnný
intenzita provozu	proměnlivý
stav komunikace, opravy	proměnlivý
nehodovost	proměnlivý
denní doba	proměnlivý
roční období	proměnlivý
stav vozového parku	proměnlivý

Tab. č. 3: Neměnné a proměnlivé faktory

2.6.1. Typ silnice

V České republice je zavedeno hierarchické členění silničních komunikací. Jedná se o nejvýznamnější faktor při stanovování návrhové rychlosti. Tento faktor v sobě do jisté míry zahrnuje i šířku komunikace, tj. počet jízdních pruhů, šířka krajnice, a svým způsobem i

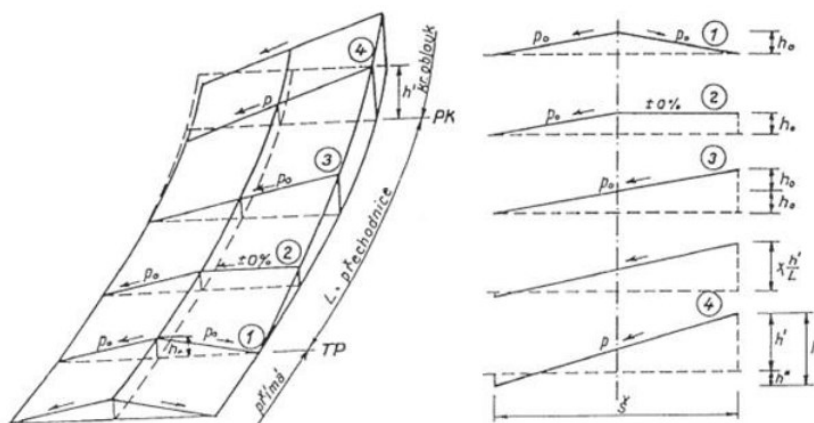
podélný a příčný sklon, neboť pro každou kategorii silnic existují extrémní hodnoty sklonu, které ze zákona není možné překročit.

Ke každé kategorii se rovněž vztahuje ze zákona maximální povolená rychlost. Největší rozdíl je stanoven mezi intravilánem a extravilánem. V obci je maximální povolená rychlost 50 km/h pokud se nejedná o dálnici nebo rychlostí silnici, v takovém případě je v obci stanovena maximální povolená rychlost 80 km/h. Mimo obec je pak povolena maximální povolená rychlost 90 km/h, na rychlostních silnicích 110 km/h a na dálnicích 130 km/h. Tyto hodnoty jsou stanoveny v zákoně č. 361/2000 Sb. Zákon o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů.

2.6.2. Sклон komunikace

Sклон je veličina udávající odchylku plochy od vodorovné roviny a spadá pod trvale působící faktory. Nejčastěji se jeho hodnota udává ve stupních nebo procentech. Jedná se základní morfometrickou charakteristiku, která určuje intenzitu geomorfologických procesů způsobenou gravitací. Sклон u silničních komunikací se dělí na příčný a podélný.

Příčný sklon p v přímém vodorovném úseku je střechovitý a dosahuje hodnoty 2,5 %. (viz. Obr. č. 5). Nenulový příčný sklon je vyžadován k nezbytnému odvodnění vozovky, tedy ke zvýšení bezpečnosti a životnosti krytu vozovky a ve směrových obloucích k eliminování odstředivé síly, která vozidlo projíždějící zatáčkou táhne mimo silnici (Pavlíček, Radimský 2011). V případě prudších zatáček na silnicích vyšších tříd se sklon zvyšuje, aby bylo možné dosáhnout bezpečně návrhové rychlosti.



Obr. č. 5: Příčný sklon komunikace (Pavlíček, Radimský 2011)

Podélný sklon s je místní odklon od vodorovné plochy. Obvykle se na silnicích udává v procentech. Návrhová hodnota podélného sklonu závisí na členitosti terénu a návrhové rychlosti, které určovala ČSN 736101 před revizí v roce 2018. Hodnoty sklonu byly rozděleny do 4 kategorií a každé přidělaná návrhová rychlost (viz. Tab. č. 4).

Typ sklonu	Rychlost [km/h] dle druhu území podle sklonu			
	Rovinné	Mírně skloněné	Pahorkovité	Horské
	do 3 %	3 - 5 %	5 - 10 %	nad 10 %
dálnice a rychlostní komunikace	110	110	100	90
silnice I. třídy	80	75	70	60
silnice II. třídy	70	65	60	55
silnice III. třídy	65	60	55	50

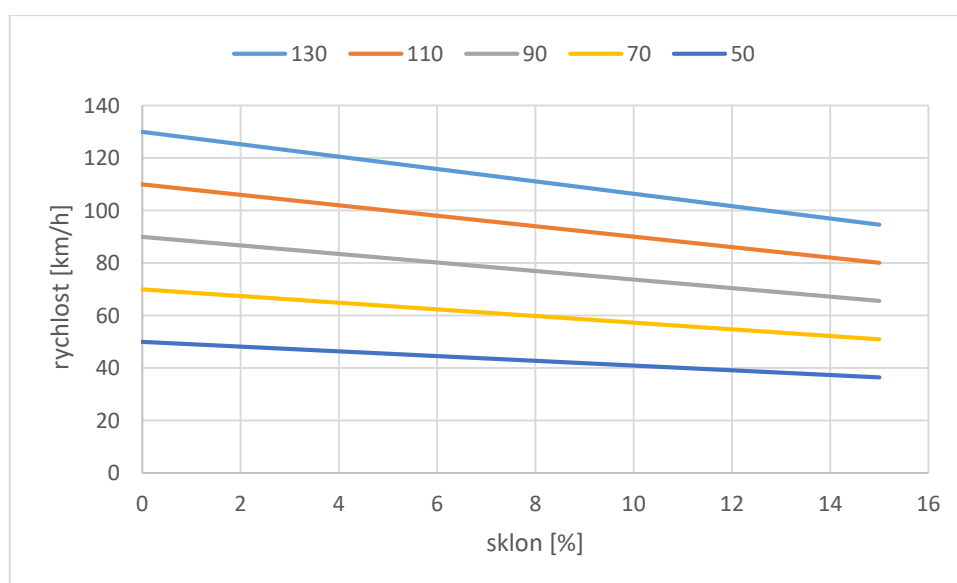
Tab. č. 4: Návrhové rychlosti dle sklonu a typu komunikace (ČSN 736101 2004 a Louthan 2010) – pouze výběr

Tématikou rychlosti při nenulovém sklonu se zabývali Reut, Shlomo, Abishai (2018). Článek se zabývá simulací chování řidičů. K dispozici měli 111 řidičů mezi lety 20 – 66, z toho bylo 44 % žen. Dohromady bylo k dispozici 9768 výsledků. Jedním z výsledků je chování v kopcovatých úsecích komunikace. Dle tohoto výzkumu se rychlost přímo váže ke sklonu komunikace. Při rychlosti 80 km/h s řidiči na jedno procento sklonu zpomalili o 1,1 – 1,8 km/h.

Z toho lze vyvodit funkční vztah, který definuje průjezdní rychlost ve vztahu k rychlosti. Autoři článku bohužel neuvedli, jaké bylo průměrné zpomalení, pouze interval hodnot. Proto byla za průměr prostřední hodnota intervalu 1,45 km/h. Ve vztahu k jejich návrhové rychlosti (80 km/h) se tedy jedná o zpomalení o 1,813 % na jedno procento sklonu (viz. Obr. č. 6).

Tedy:

$$v = v_n(1 - 0,01813s)$$



Obr. č. 6: Rychlost ve vztahu ke sklonu vozovky (vybrané rychlosti)

Předpoklad, že tato rovnice bude fungovat stejně u všech návrhových rychlostí je pravděpodobně chybný, ale to může ovlivnit celá řada faktorů, jako jsou: hybnost vozidla, odpor vzduchu, výkon vozidla a jiné. Podobně vypadající křivka vyšla autorovi článku, který se zabýval analýzou rychlosti v urbánních oblastech (Capaldo 2007). Tomu však koeficient zpomalení vyšel nepatrně vyšší.

2.6.3. Intravilán vs. extravilán

Silniční síť se mezi intravilánem a extravilánem značně liší. V intravilánu se mimo jiné vykytují také městské komunikace nižšího řádu, známé jako ulice. Ulice je speciální případ komunikace vyskytující se pouze v sídlech. Rychlost na těchto komunikacích podléhá mnoha faktorů. Ve městech se vyskytují semaforey s různými intervaly, dále křižovatky s různou intenzitou provozu a různě nastavenými přednostmi v jízdě a ve městě je různorodá intenzita provozu, která může způsobovat různé dopravní kongesce.

Nastavení parametrů pro intravilán se věnuje bakalářská práce (Černický 2018), kde jsou stanoveny průjezdní rychlosti v intravilánu převážně na základě Hudečka (2010) a rychlost v ulicích je stanovena na 20 km/h. Tato hodnota byla stanovena matematicky na základě hodnot z internetových route plannerů. Tato bakalářská práce hodnotí nastavení parametrů dle Hudečka (2008) v intravilánu za velmi přesné neboť odchylky při testování na trase dlouhé necelých 6 km, které bylo podpořeno i terénním šetřením, byly v řádech sekund (viz. Tab. č. 5).

Výpočet	Čas [min]
Černický 2018	9,62
mapy.cz	9,50
maps.google.com	9,75
terénní šetření	9,60

Tab. č. 5: Výsledky měření v intravilánu (Černický 2018)

Proto se tato práce bude věnovat pouze nastavení parametrů pro extravilán a nastavení hodnot pro intravilán bude převzato z již zmíněné bakalářské práce.

2.6.4. Intenzita provozu

Intenzita provozu je proměnlivý faktor, který může výrazně ovlivnit rychlost na komunikaci a v čase se značně mění. Příkladem může být ranní špička dojížděky za prací, kdy se ráno mohou na kritickém místech tvořit kolony, protože někde na začátku kolony je nějaké křížení, které svou kapacitou nestíhá pojmout takové množství vozidel. Kolona může také vzniknout při hustém provozu, kdy jedno z aut přibrzdí a každé auto za ním zpomalí o trochu víc. Tento jev se nazývá „Phantom Traffic Jam“. Pokud je těchto aut za sebou hodně, tak auto,

které je třeba třicáté v řadě už stojí a pak se pomalu rozjíždí (Peng et al. 2018). Tento faktor je bohužel obtížně zjištěitelný, i když už s ním některé aplikace pracují (např. Waze). Pro tato data je třeba sbírat informace o poloze a rychlosti automobilu. Ta sbírají pomocí mobilních zařízení řidičů, protože se předpokládá, že každý má u sebe v autě alespoň jeden telefon. Metodu, jak tomuto jevu předejít nabízí například inteligentní vozidlo, které sdílí informace o své rychlosti s ostatními (Arai, Ishikawa 2016). K eliminaci těchto situací na silnici by také mohlo přispět tzv. WaveDriving. Jedná se o metodu chování na silnici, které však nevychází z dodržování vzdálenosti mezi vozidly, nýbrž k dodržování setrvačnosti vlastního vozidla (Melchor et al 2018).

Tohoto předpokladu využil umělec Simon Weckert, kterému se podařilo v Berlíně vytvořit tzv. virtuální kolona. U 99 mobilních zařízení zapnul navigaci a určování GPS polohy. Tyto mobily pak naložil do vozíku, který s sebou táhl pěší chůzí po chodníku. Google Mapy pak skutečným řidičům ukazovaly v daných lokalitách kolony a naváděly je na objízdné trasy, zelené trasy se změnilly na červené (Novinky.cz 2020).

Před negativním ovlivňováním navigačních služeb varovala i komunita Waze, která apeluje na uživatele, aby navigaci nezapínaly v autobusech MHD, neboť pak se v místě zastávky autobusu tvořili virtuální kolony (Novinky.cz 2020).

2.6.5. Stav komunikace a opravy

Dle zákona 361/2000 Sb. Zákon o provozu na pozemních komunikacích musí řidič rychlost jízdy „... *přizpůsobit zejména svým schopnostem, vlastnostem vozidla a nákladu, předpokládanému stavebnímu a dopravně technickému stavu pozemní komunikace, její kategorii a třídě, povětrnostním podmínkám a jiným okolnostem, které je možno předvídat; smí jet jen takovou rychlostí, aby byl schopen zastavit vozidlo na vzdálenost, na kterou má rozhled.*“. Jedná se tedy o velmi subjektivní hodnocení, které záleží na každém řidiči a jeho schopnostech řízení. Proto pro tento faktor prakticky neexistují žádná data. Aplikace využívající data z mobilních zařízení mohou navrhnout při neprůjezdnosti komunikace náhradní trasu nebo přepočítat průjezdní rychlost pokud se na vozovce vyskytuje třeba ledovka. Aplikace však vždy vychází z rychlosti řidičů nikoliv ze stavu vozovky.

2.6.6. Nehodovost

Nehodovost je ojedinělý faktor, který může zapříčinit snížení průjezdní rychlosti v daném úseku nebo tento úsek úplně zablokovat. Jedná se o poměrně ojedinělé případy a nelze je předvídat. Jediné měření, které existuje, je počet nehod vztažený k úseku silnice. Úseky s vyšší

nehodovostí se pak mohou označit dopravním značením. Na rychlost to má minimální vliv, který navíc nelze pořádně měřit.

2.7. Poloměry směrových oblouků

Stanovení mezní rychlosti na silnicích pomocí se věnuje ČSN 73 6101 a ČSN 73 6102. Tyto normy stanovují mezní rychlost vztahující se k poloměru zatáčky. Tato funkce vychází ze vztahu:

$$v = 3,6 * \sqrt{g * R_0 * (f + 0.01 * p)}$$

kde

R_0 – Poloměr směrového oblouku [m]

f – využitelná hodnota součinitele adheze, pro výpočet dosažitelné rychlosti se $f = 0,25$

p – dostředivý příčný sklon (%), pokud opačný dosazuje se záporná hodnota

g – gravitační zrychlení $9,8 \text{ (m/s}^2\text{)}$

Pro tuto práci bude položka $p = 2,5$, jelikož nejsou dobře dostupná data o dostředivém sklonu silnic.

2.8. Deviatilita a křivolakost

Deviatilita a křivolakost jsou parametry určující tvar komunikace. Jedná se o matematické vyjádření zakřivení komunikace.

2.8.1. Deviatilita

Dopravní cesty nemají povětšinou vlivem různých faktorů ortodromický průběh. Deviatilita neboli klikatost či nepřímocíarost je odchylka dopravní cesty od přímé vzdálenosti (ortodromy). Tento pojem je často skloňován v geografii dopravy. Jedná se o poměr mezi skutečnou vzdáleností a vzdáleností po komunikaci mezi body A a B (Brinke 1999). Pokud spočítáme tento index mezi všemi uzly v síti, dostaneme pak index deviatility pro celou síť. Tento index udává míru geografické a ekonomické efektivity sítě (Seidenglanz 2017).

Index lze spočítat takto:

$$d = \frac{l_k}{l_p}$$

d – deviatilita

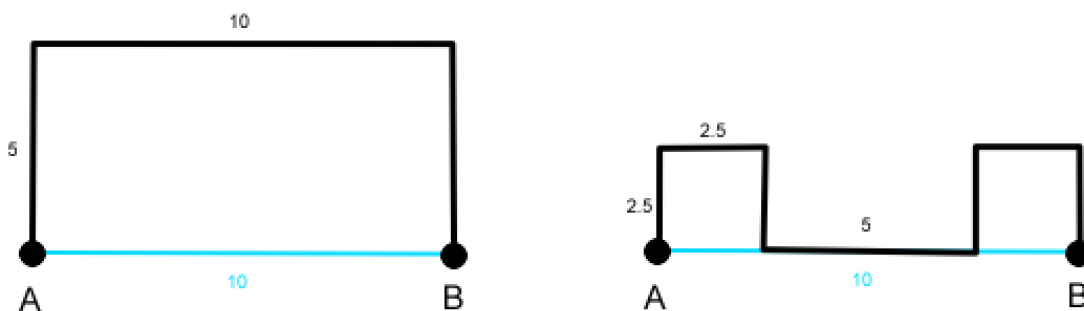
l_k – délka komunikace mezi body A a B

l_p – délka ortodromy mezi body A a B

Výsledkem této rovnice je bezrozměrné číslo, které nabývá hodnot $d \geq 1$. Pokud je hodnota rovna jedné, komunikace kopíruje ortodromu. Dá se tedy říct, čím větší je deviatilita tím je cesta klikatější. Z toho vyplývá, že obecně nejnížší deviatilitu má letecká doprava. V případě železniční sítě je deviatilita vyšší. Je však rozdíl mezi vysokorychlostními koridory, u kterých je snaha, aby byly co nejrovnější, a u železnic procházejícími kopcovatým terénem. U silniční sítě je deviatilita u dálnic zpravidla nejnížší a čím nižší je třída silnice tím deviatilita roste. Současným trendem stavby komunikací je snaha o co nejnížší deviatilitu.

Využití deviatility při hodnocení zakřivení komunikace však není vhodné (viz Obr. č. 7). Následující příklad je toho důkazem. V obou případech platí:

$$d = \frac{l_k}{l_p} = \frac{20}{10} = 2$$



Obr. č. 7: Hodnocení deviatility

Délka komunikace je v obou případech stejná, stejně tak i vzdálenost vzdušnou čarou. Pokud by toto schéma představovalo silnici, je zřejmé, že by pohyb v prvním případě probíhal

rychleji, než v případě druhém. Proto lze tuto metodu označit jako nevhodnou pro účel této práce.

2.8.2. Křivolakost

Druhým indexem popisující tvar komunikace je křivolakost. Křivolakostí se rozumí změna úhlu od původního směru. ČSN 73600-1 (2008) definuje křivolakost jako podíl sumy absolutních hodnot středových úhlů změn směru trasy připadající na jednotku délky. V prostředí GIS lze tento index spočítat pomocí základní lineární algebry. Obecný vzorec pro výpočet křivolakosti:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^j |\gamma_i|}{l} \text{ grad/km}$$

K – křivolakost

γ – celková úhlová změna

l – délka úseku

Ze vzorce vyplývá, že křivolakost je tedy přímo úměrná součtu úhlových změn v dílčích segmentech (i až j) zkoumaného úseku komunikace a nepřímo úměrná délce tohoto úseku. Slovy lze vzorec definovat jako průměrnou uhlovou změnu na jeden kilometr trasy. Pro stanovování průjezdních rychlostí využil křivolakost Bartoš (2012), který tvrdí, že křivolakost je pro tyto účely lepší, než deviatilita. Křivolakost hraje rozhodující roli při stanovení finální směrodatné rychlosti (Louthan, Svobodová, Heising 2010).

Křivolakost lze rovněž spočítat pomocí kosinové věty. V prostředí GIS lze snadno zjistit souřadnice jednotlivých zlomových bodů linie. Pokud uvažujeme tři po sobě jdoucí body, tvořící trojúhelník, lze snadno spočítat vzdálenosti mezi těmito body.

2.9. Současný stav zkoumané problematiky

Jednou ze základních prací zabývajících se problematikou dostupnosti v Česku je od Hudečka (2010). Ve své práci se věnuje průměrným průjezdním rychlostem na různých typech silnic a zohledňuje zde velké množství faktorů. Tuto problematiku také zkoumal Peňáz (2005), který se rovněž snažil stanovit pevné průjezdní rychlosti a porovnával je s rychlostí veřejné hromadné dopravy.

V zahraničí se této problematice věnovalo mnoho autorů. Například Bulai, Ursu (2012) se snažili vytvořit silniční síť v prostředí GIS, která by sloužila k přesným dostupnostním analýzám. Jako výchozí hodnoty použili maximální povolenou rychlost a následně tuto rychlost upravovali dle hierarchie silnic a jejich kvalitě. Následně pak tuto rychlost upravili v závislosti na členitosti terénu.

Podobný model byl vytvořen pro Mexickou silniční síť (Duran-Fernandet, Santos 2014), kde autoři rozdělili Mexiko do několika regionů a každému na dle jejich charakteristik specifikovali nastavení sítě. Do modelu zahrnuli rovněž cestu trajektem, kde byla použita přesná data přímo od provozovatelů těchto služeb.

Haynes, Jones, Sauerzapf, Zhao (2006) se zabývali dostupností zdravotní péče na příkladu 475 pacientů s rakovinou v severní Anglii. Tito autoři použili podobnou metodiku, jako byla použita v předchozích zmíněných studiích. Pro každou kategorii silnice použili vlastní průměrnou rychlost a tyto silnice byly ještě rozděleny na městské a rurální. Nebyla zde však použita žádná metoda zohledňující tvar a sklon komunikace.

Louthan (2010) ve své diplomové práci používá pokročilou metodu na ohodnocování komunikací. Autor představuje nástroj, který dokáže ohodnotit hranu sítě vlivem různých faktorů. Do výpočtu zde vstupuje typ komunikace, jako hlavní faktor, sklon, který autor podrobně rozebral a nastavil omezení rychlosti v obci a zakřivení komunikace. Autor ve své práci řeší též křivolakost. Metoda užitá při výpočtu zakřivení silnice spíše však připomíná deviatilitu, která navíc vychází z terénního šetření, které autor provedl.

Ve své diplomové práci se Bartoš (2012) věnoval podrobně křivolakosti. Navrhl skript, který dokáže zohlednit tvar komunikace pomocí metody křivolakosti. Na začátku práce rozebírá autor rozdíl mezi deviatilitou a křivolakostí a tvrdí, že pro přesnější ohodnocení silniční sítě je mnohem vhodnější křivolakost než deviatilita. Autor však do své práce nezahrnul vliv sklonu. Závěrem práce autor konstatuje, že využití křivolakosti přináší velké zpřesnění při hodnocení dostupnosti. S ohledem na toto konstatování se jeví metodické řešení založené na kombinaci sklonu a křivolakosti je vhodným tématem pro tuto diplomovou práci. Jak u sklonu, tak u křivolakosti lze využít definované rovnice, které budou tyto parametry počítat a následně ohodnocovat silniční síť.

3. Použitá data

Pro zpracování této práce jsou nezbytná vhodná vstupní data. Základními daty je vrstva silniční sítě aktualizovaná k 31. 12. 2019 a digitální model reliéfu 5. generace od ČÚZK. Výběr datové sady byl proveden z následujících: ArcČR500 v3.3, ZABAGED, OpenStreetMap. Srovnání viz. Obr. č. 8.

ArcČR500 v3.3 je nevhodným zdrojem, neboť tato sada je dělána pro měřítko 1 : 500000 (Arcdata Praha 2016). Linie neodpovídají reálné poloze silnic. Délka se výrazně zkracuje, ale pokud by se přesto na těchto datech prováděla analýza dostupnosti, služby (*facility*) by se od vlastních silnic mohli vzdálit natolik, že by se jiná silnice mohla stát bližší. V této datové sadě navíc chybí většina ulic ve městech a na venkově často chybí úplně. Výhodou je, že je tato sada zdarma ke stažení.

Zabaged velmi dobře odpovídá silnicím, které téměř kopíruje. Struktura dat je zde, ale poměrně složitá. Silnice se nacházejí v několika shapefilech. Některé ulice dokonce chybí a aktualizace je poměrně pomalá. Sada je navíc zpoplatněna ČÚZK.

Nejvhodnější sadou se proto jeví OpenStreetMap, která silnice kopíruje stejně dobře jako Zabaged, ale je mnohem podrobnější. Data jsou ke dostupná zdarma. Mají jednoduchou a přehlednou strukturu.



Obr. č. 8: Porovnání OSM - červeně, ZABAGED - zeleně, ArcČR500 – modře

3.1. Silniční síť

Silniční síť byla stažena z OpenStreetMap (2019). Tento projekt si klade za cíl tvorbu volně dostupných geografických dat s následnou vizualizací do map topografických. Projekt OpenStreetMap byl inspirován podobnými projekty, jako je Wikipedia, která umožňuje svým uživatelům snadnou editaci obsahu. Tato data jsou poskytována s licencí Open Database License, která umožňuje uživatelům svobodně sdílet a používat data za podmínky poskytnutí stejné svobody ostatním uživatelům. Jedná se o velmi rozsáhlou a kvalitní databázi. Alternativou k OSM může být například ZABAGED, které se v měřítku Česka svou podrobností může rovnat OSM. Tato databáze je však placená a studentům se zdarma poskytuje jen omezené množství. Dalšími komerčními databázemi jsou CEDA nebo ArcČR500. V případě ArcČR500 se jedná, jak už název napovídá, o měřítko 1 : 500 000, které je naprosto nevyhovující pro účely této práce. Open Database License a vhodné měřítko bylo hlavním důvodem volby OSM.

Pro účely této práce byl vybrán územní výřez, na kterém probíhalo testování. Jedná se o okolí měst Písek a Protivín a jim přilehlých vesnic. V těchto místech se nacházejí všechny kategorie silnic, u kterých se zkoumá jejich křivolakost a sklonitost. Reliéf v tomto regionu je jako rovinatý tak kopcovitý. Celé území má rozlohu cca 300 km² a celková délka testovací silniční sítě je cca 450 km.

Po vymezení území a oříznutí silnic, byla zkontrolována jejich aktuálnost. Pomocí serveru Ředitelství silnic a dálnic byly dohledány úseky, které byly vybudovány nebo zrekonstruovány v letech 2018 až 2019. Ve vymezeném území se nacházel pouze jediný úsek, který databáze neobsahovala, proto byl tento úsek v prostředí ArcGIS s využitím *Topographic Basemap* (OSM 2020) dovektorizován a následně byla zkontrolována topologie sítě.

Pro správné fungování sítě bylo nutné nejdříve zvolit potřebné atributy, které vstupují do výpočtu síťových analýz. Některé atributy byly již součástí databáze OSM, ale některé bylo třeba upravit nebo přidat.

Kategorie silnic je základním určujícím parametrem rychlosti. Právě kategorie silnic z velké části určuje šířku silnice, maximální podélný a příčný sklon vozovky a návrhovou rychlost dle ČSN 73 6101 (2018)

Data od OpenStreetMap jsou strukturována do dvanácti kategorií. Mezi pět základních patří dálnice, silnice pro motorová vozidla a silnice I., II. a III. třídy. K těmto pěti základním je zaveden „podtyp“ v podobě různých připojovacích a odbočovacích pruhů (např. mimoúrovňová křížení). Zbýlé dvě kategorie obsahují městskou infrastrukturu (ulice) a ostatní neklasifikované komunikace.

Pro neklasifikované silnice není specifikována žádná zákonná norma, proto byly zařazeny do kategorie silnic III. třídy, neboť jim jsou nejpodobnější. Ve zkoumaných případech se jednalo o cesty k chatovým oblastem nebo častěji používané polní cesty, které vedly ke stavbám na samotce nebo cesty, které nahradily nové obchvaty.

Data OSM byla rozdělena dle toho, zdali se nalézají uvnitř či vně *intravilánu*. Pro tento účel byla využita datová sada CEDA, která tuto informaci obsahuje. Intravilánem se rozumí zastavěná a kompaktní/ucelená ohraničená část území (obce), popřípadě zastavěné plochy a plochy určené k zástavbě. Rozlišuje okolí silnice, která se buď vyskytuje v zastavěné, nebo nezastavěné oblasti. Tento atribut je důležitý při stanovování průjezdných rychlostí, neboť dle zákona je rychlost v obcích (intravilánech) omezena na 50 km/h nebo ve speciálních případech na 80 km/h pokud se jedná například o dálnici nebo silnici pro motorová vozidla. Ve speciálních případech, kdy silnice prochází intravilánem, se rychlost upravuje jinou nadřazenou zákazovou značkou, která může rychlost zvyšovat či snižovat. Jedná se o ojedinělé případy a tyto případy bohužel nejsou ve vstupních datech nijak ošetřeny. V jiných případech, kdy se zástavba vyskytuje pouze na jedné straně komunikace, není jasné, zde už se jedná o intravilán či nikoliv. Tyto případy se primárně vyskytují v okolí silnic druhé a třetí třídy.

V metodice byly zahrnuty jednosměrné ulice, které jsou v datech OSM rozděleny atributem *oneway*. Tento atribut nabývá tří hodnot: obousměrné silnice, jednosměrné silnice ve směru vektoru a jednosměrné silnice proti směru vektoru. U nově zvektorizovaných úseků bylo důležité vektorizovat je v určitém směru, neboť orientace linie hraje v tomto případě zásadní roli. Počátek linie je v počátečním vertexu, který byl pomocí *Create Feature* vložen do linie. Pokud se tedy vektorizuje jednosměrná ulice, musí to být provedeno ve směru té ulice, pokud je tomu naopak, tak tento problém lze řešit funkcí *Flip Line*, která převrátí pořadí vertexů, ve kterém byly pořízeny.

Faktor jednosměrek maximalizuje přesnost výsledků při modelování jakékoliv dostupnosti na této síti. Při detailnějším pozorování sítě bylo zjištěno, že některé kruhové objezdy nejsou vytvořeny jako jednosměrky, tudíž se dá projet i po směru hodinových ručiček. Pokud se však jedná o malý kruhový objezd, odchylka od výpočtu bude v řádu jednotek sekund. V případě dálnic už jednosměrnost hraje zásadní roli, neboť pokud je v sérii po sobě jdoucích linií jedno opačně orientovaná, dálnice se jeví jako neprůjezdná.

Nejdůležitějším atributem, který vstupuje do výpočtu, je rychlost. Rychlost je určena především z atributu „Třída silnice“, neboť na základě tohoto atributu je definována mezní rychlost. Pro některé třídy není jasné stanovena rychlost, proto byly rychlosti pro nájezdy/sjezdy převzaty z Černický (2018), kde bylo provedeno terénní šetření, právě pro stanovení rychlostí na těchto úsecích. Z hodnoty průjezdných rychlostí a hodnoty atributu *Shape_Length* je vypočítán atribut *cas*, který udává potřebný čas pro průjezd jedním segmentem (viz. Kapitola č. 4 Metodika).

3.2. Digitální model terénu

Pro účely této práce byl využit digitální model reliéfu od ČÚZK. Jedná se o digitální model reliéfu 5. generace (DMR 5G). Tvoří ho množina diskrétně rozdělených bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN). Body nesou informaci o souřadnicích X, Y a H, kde H představuje nadmořskou výšku počítanou pro výškový referenční systém Balt po vyrovnání (BpV) (ČÚZK 2018). Data byla pořízena metodou laserového skenování pomocí letadla. Chybovost tohoto modelu se v odkrytém terénu pohybuje kolem 18 cm a v zalesněném terénu kolem 30 cm. V současné době se jedná o nejpřesnější dostupný model.

Data jsou obvykle zpoplatněna, ale pro účely této práce byla Českým úřadem zeměměřičským a katastrálním poskytnuta zdarma. Jedná se o 20 listů o velikosti 2,5 x 2 km. Každý z těchto listů obsahuje cca 500 000 – 1 000 000 bodů.

Model je pravidelně verifikován a aktualizován metodou digitální stereofotogrammetrie nebo již zmíněnou metodou laserového skenování. Aktualizace modelu byla zahájena 1. 7. 2016. Poslední aktualizace produktu proběhla v roce 2017. Tato aktualizace se vztahuje na velmi málo listů. Zájmové území, kterým se tato práce zabývá, bylo vytvořeno v roce 2011.

Model byl využit pro doplnění souřadnic Z do sítě, aby bylo možné počítat sklonitost vozovky. Ze surových dat byl vytvořen raster, ze kterého se následně extrahovaly hodnoty pixelu do vertexů linie.

4. Metodika

Cílem práce je vytvoření algoritmu, který je schopen počítat zakřivení zatáček a přiřazovat těmto úsekům průjezdní rychlost, která odpovídá poloměru zatáčky. Do algoritmu též vstupuje vliv reliéfu, který má rovněž vliv na rychlost vozidel na silnicích. Pro implementaci tohoto algoritmu je zapotřebí vytvořit skript v Pythonu.

4.1. Použitý software

Pro úpravu a aktualizaci vektorové vrstvy silniční sítě byl použit ArcGIS Pro 2.5 od firmy ESRI. Součástí tohoto programu jsou rovněž různé extenze, které rozšiřují jeho funkčnost. První využitou extenzí je *3D Analyst*, který umožňuje využití funkcí pro práci s DMR5g a jeho převodu do rastrové podoby. Druhou extenzí je *Network analyst*, která umožňuje uživateli provádět nejrůznější analýzy na síti jako je *Route*, *Service Area* a další.

ArcGIS Pro 2.4 je dodáván interpretor jazyka Python 3.6.2, který obsahuje knihovnu *Arcpy*. Tato knihovna umožňuje uživateli využít funkce, které jsou součástí hlavního programu včetně jeho extenzí. Důvodem výběru tohoto softwaru je jeho rozšířenost a možnost kompatibilního programování a skriptování. Právě pomocí této verze Pythonu byl implementován zmíněný algoritmus. Implementace probíhala v prostředí PyCharm 2019.2.3, který tvoří uzavřené virtuální prostředí a tím eliminuje možnost přepsání nebo odstranění důležitých dat z počítače. Navíc se jedná o volně dostupný program.

4.2. Stanovení průjezdových rychlostí

Stěžejní hodnotou pro výpočet dostupnosti je rychlost. Hodnota této veličiny závisí především na typu silnice, a zdali se nachází uvnitř nebo vně intravilánu. Co se týče rychlostí v intravilánu, hodnoty byly převzaty z výzkumu (Černický 2018), kde bylo provedeno navržení i testování těchto hodnot a bylo zjištěno, že velmi dobře odpovídají realitě, z tohoto důvodu zde nebyla použita metoda počítání křivolakosti ani nebyl vzat v úvahu faktor převýšení. Křivolakost lze samozřejmě brát v potaz i v intravilánu, ale jelikož se zejména ve větších obcích vyskytuje velké množství dopravních omezení, semaforů, dopravních koncesí a jiných faktorů ovlivňující plynulost provozu, rozhodl jsem se intravilán vyjmout z počítání křivolakosti. Navíc se ve městě často odbočuje, což by výpočet křivolakosti mohlo značně ovlivnit.

Proto byly navrženy následující hodnoty rychlosti pro jednotlivé kategorie silnic (viz. Tab. č. 6). Tyto hodnoty jsou kombinací hodnot z ČSN 73 6101, Louthan (2010) a vlastního terénního šetření.

typ silnice	navržená rychlost [km/h]	
	extravilán	intravilán
silnice pro motorová vozidla	110	70
silnice 1. třídy	90	30
silnice 2. třídy	85	20
silnice 3. třídy	80	20
ulice	-	20

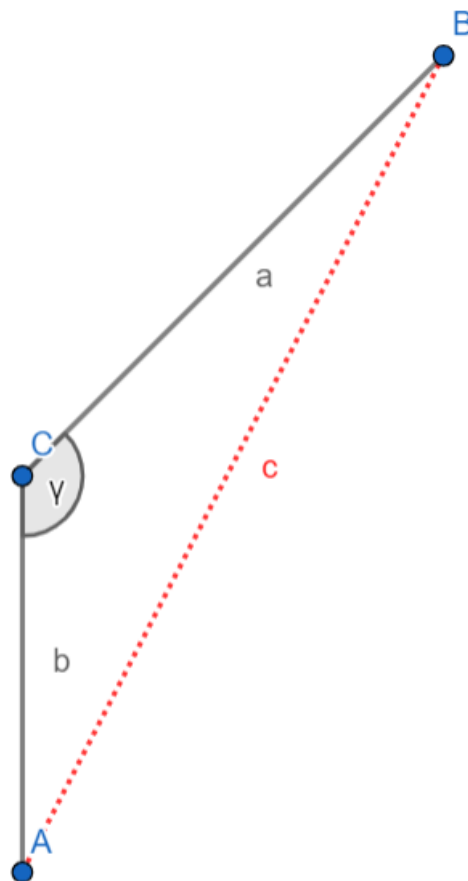
Tab. č. 6: Navržené rychlosti pro vrstvu silniční sítě

V již zmíněném výzkumu (Černický 2018) bylo zjištěno, že průměrné průjezdní rychlosti v extravilánu dle Hudečka (2008) v současné době již neplatí. Dle výsledků mnoha výzkumů (např. Bartoš (2012) či Louthan (2010)) je křivolakost významným faktorem, který má vliv na průjezdní rychlosti. S implementací křivolakosti lze dosáhnout daleko přesnějších hodnot průjezdních rychlostí.

Myšlenka křivolakosti je taková, že auto v prudších zatáčkách zpomalí, aby ho odstředivá síla nevymrštila ze zatáčky. Křivolakost jako veličina nepřímo vstupuje do rovnice definované v ČSN 73 6101 v podobě poloměru směrového oblouku (zatáčky). Rovnice popisuje maximální možnou rychlost, která je potřebná k bezpečnému průjezdu zatáčky. V prostředí GIS lze jako zatáčku brát jakoukoliv linii, jejíž 3 po sobě jdoucí vertexy neleží na jedné přímce. Mezi těmito třemi body se spočítá křivolakost a z křivolakosti lze dopočítat poloměr směrového oblouku, který lze dosadit do rovnice definované v ČSN 73 6101, která definuje mezní rychlost pro průjezd tímto úsekem. Pokud je hodnota vyšší, než je původní rychlost v atributové tabulce, hodnota průjezdní rychlosti se nemění, pokud rychlost vyjde nižší, rychlost se přepíše na hodnotu, která vzešla z rovnice.

Například máme-li 3 body o určitých souřadnicích (viz Obr. č. 10), které neleží na jedné přímce, lze pomocí nich utvořit trojúhelník. Odvěsny trojúhelník *ABC* představují část trasy dálnice, pro kterou je počítána křivolakost a přepona je přímá vzdálenost (ortodroma) mezi dvěma koncovými body. Hodnoty jsou udávány v metrech.

$A[0; 0]$,
 $C[0; 400]$,
 $B[424.3; 824.3]$



Obr. č. 10: Příklad

Pro kosinovou větu

$$\gamma = \arccos \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}$$

je potřeba nejprve zjistit délky všech stran trojúhelníka ABC . Pomocí vzorce pro vzdálenost dvou bodů, lze tyto hodnoty snadno zjistit:

$$|AC| = \sqrt{(x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2}$$

Po dosazení do vzorce dostáváme následující hodnoty délek stran trojúhelníka:

$$|AC| = b = 400 \text{ m}$$

$$|BC| = a = 600 \text{ m}$$

$$|AB| = c = 927.1 \text{ m}$$

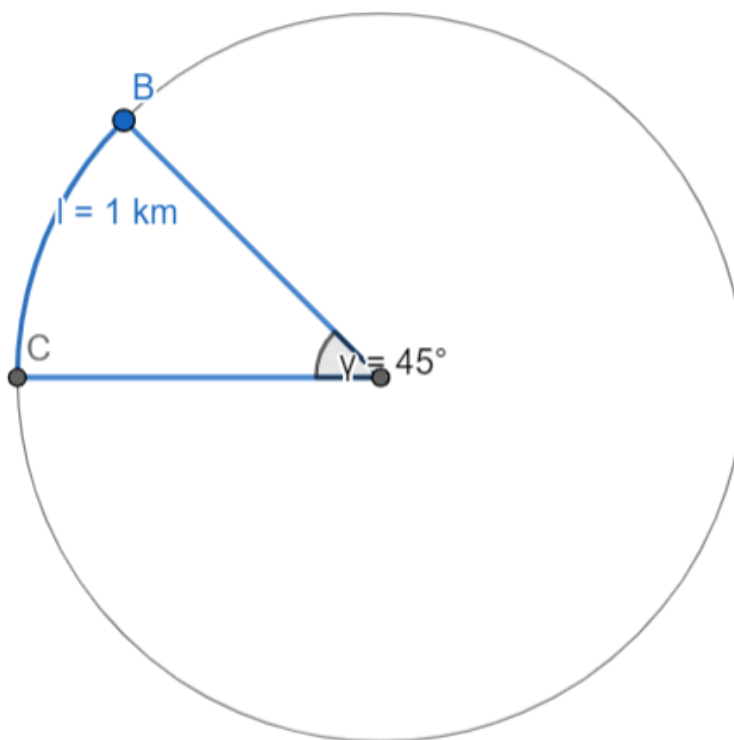
Nyní, když jsou známé délky stran, lze dosadit do kosinové věty. Po dosazení vychází úhel $\gamma = 135^\circ$. Výsledný úhel však potřebná není úhlové změna potřebná pro výpočet křivolakosti. Úhlové změna je doplněk do 180° tohoto úhlu:

$$\gamma' = 180^\circ - \gamma = 45^\circ$$

Nyní lze znovu využít vzorec pro křivolakost a dosadit, kde již známe úhel γ a l , které se rovná součtu stran a a b .

$$K = \frac{\sum_{i=1}^j |\gamma_i|}{l} = \frac{\gamma'}{b + a} = \frac{45^\circ}{1000} = 45^\circ/km$$

Pro zjištění mezní rychlosti v tomto úseku je třeba zjistit, jak velký poloměr má jeho kružnice. Nejedná se o kružnici opsanou ani vepsanou. Jelikož data OSM nejsou křivky, ale úsečky mezi vertexy, je třeba jí dopočítat. Vycházíme-li z toho, že křivolakost na úseku dlouhém 1 km je 45° , je možné si představit následující kružnici (viz. Obr. č. 11):



Obr. č. 11: Kružnice pro výpočet mezní rychlosti

Na obrázku je vidět úhel γ jehož velikost je vypočítaných 45° . Vzdálenost mezi body B a C je po kružnici rovna spočítanému l . Nyní je několik způsobů, jak spočítat poloměr kružnice R_0 . Tím, dle mého názoru, nejjednodušším je dopočítat kružnici přes jeden stupeň.

$$o = \frac{2\pi l}{K} = \frac{360 \times 1}{45} = 8 \text{ km}$$

$$R_0 = \frac{o}{2\pi} = \frac{8}{2\pi} = 1,27 \text{ km}$$

Nyní stačí využít vzorec definovaný v ČSN (viz. Kapitola 2.7):

$$v = 3,6 * \sqrt{g * R_0 * (f + 0.01 * p)}$$

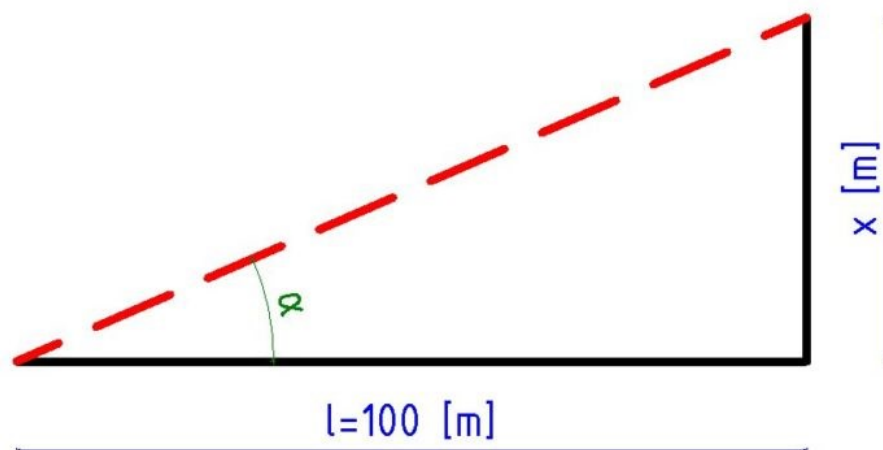
$$v = 3,6 * \sqrt{9,81 * 1270 * (0,25 + 0.01 * 2,5)}$$

$$v = 211 \text{ km/h}$$

Rychlost byla počítána pro dálnici, kde v tomto úseku vyšla mezní rychlost 211 km/h. Lze tedy říct, pokud mezní rychlost přesahuje maximální povolenou (130 km/h), není třeba na tomto úseku rychlost nijak upravovat. Pokud by však rychlost vyšla nižší než 130 km/h, je zapotřebí rychlost omezit na vypočtenou rychlost.

4.3. Využití digitálního modelu terénu

Digitální model terénu byl použit pro určování sklonu úseků sítě. Pomocí nástroje *Interpolate shape* se síť podle hodnoty z digitálního modelu terénu přetransformovala do 3D a změnila se jí i hodnota v atributu *Shape_Length* neboť při převodu dochází ke zvětšení vzdálenosti vertexů vlivem vertikálního pohybu vertexů (viz. Obr. č. 12).



Obr. č. 12: Vliv funkce *Interpolate shape* na vertexy linií

Pomocí nových hodnot vertexů bylo možné spočítat sklon silnice, který má vliv na plynulost jízdy a tím pádem i na průjezdní rychlost (Reut, Sholomo, Abishani 2018). Louthan (2010) ve své práci vytvořil tabulku popisující vliv sklonu na rychlost a sklon rozdělil do 4

kategorií, jedná se tedy o poněkud diskrétní rozdělení. Toto rozdělení do jisté míry kopíruje funkční vztah z kapitoly 2.6.2. Jelikož se jedná o spojitou funkci, lze každé hodnotě sklonu přiřadit novou hodnotu rychlosti. Teoreticky by tak měly vycházet přesnější hodnoty než u diskrétního rozdělení hodnot. Zanedbány byly sklony do hodnoty 3 %, neboť takto malý sklon není relevantní, možno ho zanedbat.

4.4. Příprava dat pro testování

Pro správné vyhodnocení funkčnosti skriptu je nezbytné testování a s tím spojená příprava testovacích dat. Zdroje dat jsou popsány v kapitole 3. Tuto přípravu nelze implementovat do skriptu, neboť je na uživateli, jaké vstupní hodnoty rychlostí a intravilánu chce použít.

4.4.1. Příprava silniční sítě

Před spuštěním skriptu je potřeba pohlídat relevantní atributy. Prvním z nich je vstupní rychlost na komunikaci. V tomto případě se bude jednat o rychlost pohybu vozidel na českých silnicích. Data OSM jsou dělena i na kategorie sjezdů a nájezdů. Tyto části sítě často spojují 2 různé třídy silnic. Tyto části byly zahrnuty do vyšší třídy silnice z těch dvou, které spojují.

Hodnoty pro intravilán a sjezdy/nájezdy jsou převzaty z bakalářské práce (Černický 2018). Hodnoty v extravilánu jsou u silnic druhé a třetí třídy převzaty z diplomové práce (Louthan 2010), neboť je v ní použita ozkoušená metoda získání těchto hodnot. U silnic první třídy a silnic pro motorová vozidla byla hodnota stanovena na maximální povolenou rychlost, neboť tyto silnice v drtivé většině splňují zákonem dané parametry a parametry týkající se poloměrů směrového oblouku řeší implementovaný algoritmus. Třetí zmíněný atribut je délka vektoru (*Shape_Length*), tento atribut je počítán automaticky v datovém modelu ESRI Geodatabase.

4.4.2. Příprava digitálního modelu terénu

Digitální model terénu byl získán od ČÚZK. Data byla ve formě bodového mračka ve formátu .xyz. Tento soubor byl následně otevřen v MS Excel, a uložen jako soubor .csv. Následně byl vytvořen jednoduchý skript, který všech 20 souborů přečetl a zapsal do jednoho. Tento soubor byl posléze otevřen v ArcGIS Pro. Aby tato data mohla vstoupit do implementovaného algoritmu, bylo potřeba je převést z vektorové podoby do rasterové. Jako interpolační metoda byla využita funkce *Topo to Raster*.

Nástroj *Topo to Raster* je metoda interpolace speciálně navržená pro vytváření hydrologicky správných digitálních výškových modelů (Esri 2020). Velikost buňky rasteru byla nastavena na 2x2 metry.

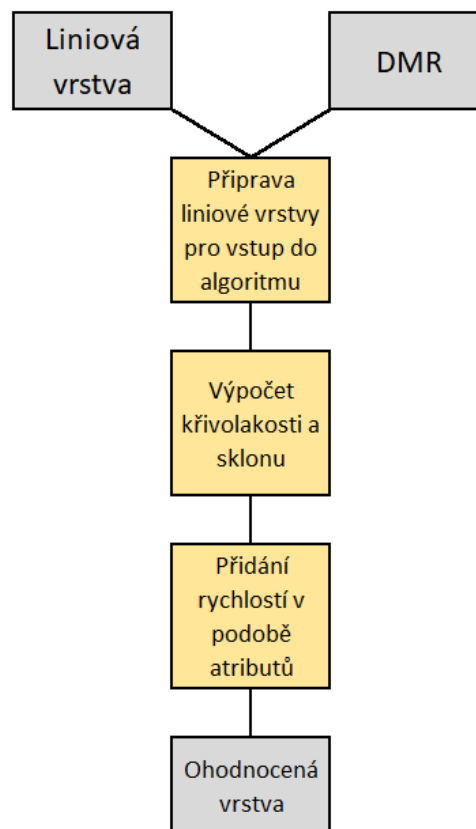
4.5. Python

Jak již bylo zmíněno, pro tvorbu algoritmu byl zvolen jazyk Python. Python je moderní skriptovací jazyk. Jedná se o objektově orientovaný a platformě nezávislý jazyk. Od roku 2001 je spravován neziskovou organizací Python Software Foundation (PSF). Python je vyvíjen jako open source projekt, který zdarma nabízí instalační balíky pro většinu běžných platform (Unix, MS Windows, macOS, Android). Mimo jiné se jedná o hlavní skriptovací jazyk pro ArcGIS Pro a obecně pro odvětví GIS.

4.6. Funkcionalita kódu

Pro kompletní implementaci algoritmu byly vytvořeny dva soubory *.py*, které jsou rozděleny podle své funkcionality. Hlavní skript *line_evaluator.py* definuje proměnné a volá funkce algoritmu z druhého skriptu *functions.py*. Postup práce skriptu je znázorněn v následujícím schématu a posléze podrobněji popsán v další kapitole.

- Skript nejprve načte vstupní data (liniovou vrstvu a DMR)
- Následně upraví liniovou vrstvu pro vstup do algoritmu a přidá jí souřadnice Z z DMR
- Pokračuje výpočtem křivolakosti a linie „rozstřihá“ v místech, kde je potřeba dosadit nově vypočtenou hodnotu pro rychlost
- Následuje vypočítání a dosazení hodnot v rozdělených liniích a jejich uložení do atributové tabulky. Rychlost je uložena ve dvou sloupcích (z kopce, do kopce)



4.6.1. Použité knihovny a proměnné

Nepsaným pravidlem při skriptování bývá, že prvním krokem při tvorbě skriptu je načtení potřebných knihoven. V tom to případě se jedná o knihovny `arcpy` a `math`. Knihovna `arcpy` umožňuje přistupovat k funkcím z prostředí ArcGIS. Ačkoliv je Python šířen jako freeware, knihovna `arcpy` není volně dostupná jako package. Tato knihovna je importována do obou dílčích skriptů. Do hlavního skriptu je importován dílní skript *funcitons.py*.

```
import arcpy, functions
```

Druhou importovanou knihovnou je knihovna `math`. Z této knihovny byly importovány jen vybrané funkce, aby skript mohl pracovat rychleji. Jedná se o goniometrické funkce a funkci odmocniny. Dílčí funkce této knihovny jsou importovány pouze do *functions.py*.

```
import arcpy
from math import sqrt, acos, pi
```

Dále se na začátku hlavního skriptu definují použité proměnné. Hlavními proměnnými jsou `fc_bacis`, `dem` a `fc_output`. První dvě představují vstupní data nezbytná pro fungování skriptu, proměnná `name` je důležitá pro zadání názvu souboru při ukládání a ta poslední slouží pro určení cesty k uložení dat.

```
fc_bacis = arcpy.GetParameterAsText(0)
fc_output = arcpy.GetParameterAsText(1)
name = arcpy.GetParameterAsText(2)
dem = arcpy.GetParameterAsText(3)
```

Všechny tyto proměnné vstupují jako parametr do výsledného nástroje (*Tool*). Mezi další parametry patří dvě pole, které bude muset uživatel vybrat jako rychlost a intravilán. Tyto parametry vstupují do funkce jako atributy příslušné liniové vrstvy silniční sítě.

```
speedField = arcpy.GetParameterAsText(4)
inExField = arcpy.GetParameterAsText(5)
```

4.6.2. Minimální parametry vstupních dat

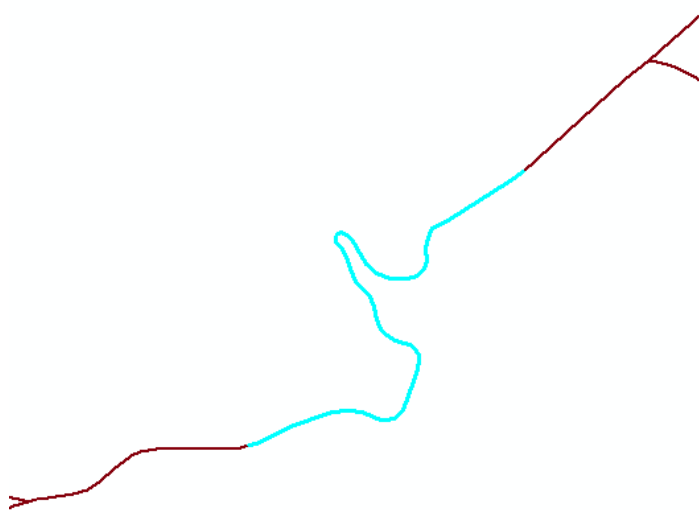
Pro správné fungování skriptu je nezbytné, aby byla nějakým způsobem standardizována. Jelikož skript bere v úvahu rychlost (dle kategorie silnice) a zda se silnice nachází uvnitř či vně intravilánu. Proto je zapotřebí, aby vstupní data obsahovala 2 povinné atributy. Rychlost, ze které se pak bude vypočítávat hodnota vycházející z křivolakosti a sklonu. Druhým atributem

je *intravilan*. Tento atribut by měl nabývat hodnot 0 a 1. Pokud si budoucí uživatel bude přát vynechat vliv intravilánu, je nezbytné, aby tento atribut (ať už se jmenuje jakkoliv) jeho silniční síť obsahovala a jeho hodnota musí být rovna nule.

V případě digitálního modelu terénu je zapotřebí, aby byl ve formě rasteru. Velikost buňky a rozsah území je na uživateli. Pokud však uživatel nemá k dispozici digitální model terénu nebo nechce započítat jeho vliv, tak silniční síť musí obsahovat číselnou hodnotu ve své souřadnici Z, jinak výpočet neproběhne.

4.6.3. Úprava liniové vrstvy

Po nahrání vstupních dat je potřeba síť připravit do podoby, která bude vyhovovat implementovanému algoritmu. Algoritmus vyžaduje, aby linie byla co nejcelistvější a nebyla po aplikaci algoritmu zbytečně „rozstříhaná“. Data ve své originální podobě jsou rozdělena na velké množství menších linií, které dohromady tvoří například jednu silnici. Mezi dvěma úrovněmi křižovatkami se často nachází více, než jedná dílčí linie (viz Obr. č. 13). Proto bylo navrženo, aby se mezi každým úrovněm křížením nacházela právě jedna linie.



Obr. č. 13: Dílčí část silnice

Toho lze dosáhnout aplikací několika nástrojů z knihovny *arcpy*. První použitou funkcí je funkce *Dissolve*. Tato funkce se často používá pro rozdělení dat na základě nějakého volitelného atributu (*Dissolve field*). Pokud však pole pro atribut necháme prázdné, zakážeme vytváření *Multipart features* (*Create multipart features*) a dělení linií (*Unsplit lines*), výsledkem je sjednocení linií mezi dvěma úrovněmi křižovatkami. Silnice v intravilánu jsou ponechány beze změny.

Tato funkce však nepřenesle všechny atributy z původní vrstvy do nové, proto je zapotřebí tyto informace přenést pomocí funkce *Spatial join*. Zde se všechny chybějící informace přenesou z původní vrstvy do nové. *Join operation* je potřeba nastavit na *Join one to one* a *Match Option* na *Intersect*.

Poslední funkcí před vstupem geometrie sítě do algoritmu je přidání 3D prvku. Funkce *Interpolate shape* přidá síti, na základě vstupního digitálního modelu terénu, souřadnici Z každému vertexu linie a upraví hodnoty atributu *Shape_Length*.

Tento soubor funkcí se nachází ve v modulu *functions.py* a je implementován jako samostatná funkce (v Pythonu) *editLines*.

```
def editLines (fc_bacis,fc_output,dem,inExField):
    fc_extra = fc_output + "/extra"
    fc_intra = fc_output + "/intra"
    fc_merge = fc_output + "/merge"
    fc_dissolve = fc_output + "/dissolve"
    fc_SpatialJoin = fc_output + "/SpatialJoin"
    fc_input = fc_output + "/ready_lines"
    expression1 = inExField + "=1"
    expression2 = inExField + "=0"
    arcpy.FeatureClassToFeatureClass_conversion(fc_bacis, fc_output, "intra",
expression1)
    arcpy.FeatureClassToFeatureClass_conversion(fc_bacis, fc_output, "extra",
expression2)
    arcpy.Dissolve_management(fc_extra, fc_dissolve, "", "", "SINGLE_PART",
"UNSPLOT_LINES")
    arcpy.SpatialJoin_analysis(fc_dissolve, fc_bacis, fc_SpatialJoin,
"JOIN_ONE_TO_ONE", "", "", "INTERSECT")
    arcpy.Merge_management([fc_SpatialJoin, fc_intra], fc_merge)
    arcpy.InterpolateShape_3d(dem, fc_merge, fc_input)
```

4.6.4. Dělení linií

Po sjednocení linií mezi křižovatkami se linie nyní musí opět dělit, aby bylo možno ohodnotit zakřivené úseky. Dělení má jistá pravidla, která jsou implementována v algoritmu. V dílčím skriptu *functions.py* je implementována funkce *splitPoints*. Tato funkce má za úkol vytvořit bodovou vrstvu, podle které se následně bude linie dělit. Funkce nejprve vytvoří seznam.

```
def splitPoints(exp, fc_input, fc_output, speedField, pnts_fc):
    splitPnts = []
```

Tento seznam obsahuje souřadnice X , Y a Z . To je dostatečné k tomu, aby z nich bylo možné vytvořit dočasnou bodovou vrstvu, potřebnou k použití funkce *Create Feature Class*.

Pro vytvoření seznamu obsahující souřadnice je potřeba přechít geometrii linie. Geometrie se ve strukturách linie jeví jako samostatný atribut s názvem `SHAPE@`. Samozřejmě, že se nejedná o typický atribut, ale do funkce *SearchCursor* z knihovny *arcpy* se `SHAPE@` vkládá jako *Field Name*. Vytvořením kurzoru a jeho vložení do cyklu, je skript schopen projít geometrii každé linie ze vstupního souboru.

```
with arcpy.da.SearchCursor(fc_input, [speedField, "SHAPE@"], exp) as cursor:
    for row in cursor:
        polyLine = row[1]
```

Skript načte údaje o geometrii do proměnné `polyLine` a ta dále vstupuje do dalšího vnořeného cyklu. Tento cyklus se dále dělí na dvě části podle splnění podmínky, zdali linie obsahuje méně než 3 vertexy nebo 3 a více vertexů. Pokud linie obsahuje více než 2 vertexy, skript přejde k dalšímu vnořenému cyklu a prochází vždy 3 po sobě jdoucí body a vypočítá mezi nimi jejich vzájemnou vzdálenost. Následuje vypočtení úhlu γ a následně výpočet křivolakosti a obvod kružnice, ze kterého vychází směrový oblouk (stejně jako v kapitole 2.8.2).

```
for i in range(0, total - 2):
    pnt1 = line[i]
    pnt2 = line[i + 1]
    pnt3 = line[i + 2]
    a = sqrt((pnt2.X - pnt1.X) ** 2 + (pnt2.Y - pnt1.Y) ** 2 + (pnt2.Z - pnt1.Z)
** 2)
    b = sqrt((pnt3.X - pnt2.X) ** 2 + (pnt3.Y - pnt2.Y) ** 2 + (pnt3.Z - pnt2.Z)
** 2)
    c = sqrt((pnt1.X - pnt3.X) ** 2 + (pnt1.Y - pnt3.Y) ** 2 + (pnt1.Z - pnt3.Z)
** 2)
    kosin = ((a * a + b * b - c * c) / (2 * a * b))
```

Ve skriptu je ošetřen případ, kdy se tři po sobě jdoucí body nacházejí na jedné přímce, v tomto případě se do obvodu kružnice, ze které vychází směrový oblouk, dosadí vysoká hodnota, aby nedocházelo ke snížení vypočítané mezní rychlosti.

```
if K == 0:
    o = 100000
```


Pokud výsledná rychlost vyjde vyšší než je původně stanovená v atributové tabulce, skript tuto rychlost omezí na původní rychlost stanovenou v atributu. V opačném případě rychlost přepíše a stanoví nově vypočtenou.

```
if v0 > row[0]:  
    v = row[0]  
else:  
    v = v0
```

Před vytvořením samotného souboru je potřeba údaje zapsat do seznamu. Pro zapsání souřadnic do seznamu byly vytvořeny další podmínky pro zápis, neboť algoritmus by zapisoval příliš mnoho souřadnic. Z toho vyplývá, že by bylo vytvořeno velké množství bodů a to znamená i mnoho dílčích linií, které by byly velmi krátké. Proto byly vytvořeny dvě podmínky. První je, že se linie nebude dělit, pokud je rozdíl rychlosti menší než 10 km/h. Hodnota bude pouze přepočítána váženým průměrem a dosazena. A druhou podmínkou je, že se linie nebude dělit, pokud by obsahovala méně než 3 vertexy.

Nyní už následuje vytvoření souboru pomocí funkce *Create Feature Class* a uložení tohoto souboru do geodatabáze.

```
arcpy.CreateFeatureclass_management(fc_output, 'splitPnts', 'POINT',  
spatial_reference=fc_input)  
with arcpy.da.InsertCursor(pnts_fc, ["SHAPE@XY"]) as cursor:  
    for pnt in splitPnts:  
        xy = (pnt.X, pnt.Y)  
        cursor.insertRow([xy])
```

4.6.5. Vytvoření atributů

Následuje vytvoření atributů pomocí definované funkce *addAttributes*. Tato funkce vytvoří 5 atributů a přidá je do atributové tabulky souboru, který právě prošel „dělením“ ve funkci *splitPoints*. Jedná se o atributy *ftSpeed*, *tfSpeed*, *ftTime*, *tfTime* a *avgTime*. Dané atributy jsou datového typu *Float*.

```
def addAttributes(finallines):  
    arcpy.AddField_management(finallines, "ftSpeed", "FLOAT")  
    arcpy.AddField_management(finallines, "tfSpeed", "FLOAT")  
    arcpy.AddField_management(finallines, "ftTime", "FLOAT")  
    arcpy.AddField_management(finallines, "tfTime", "FLOAT")  
    arcpy.AddField_management(finallines, "avgTime", "FLOAT")
```

4.6.6. Přidání hodnoty rychlostí

Pro přidání hodnot rychlostí bylo třeba vytvořit další funkci `addSpeeds`. Předchozí funkce sice rychlosti vypočetla a vytvořila body pro dělení linie, ale samotná funkce, která linie dělí (*Split line at Point*) bohužel změnil pořadí linií v souboru a tudíž není možné ze seřazeného seznamu hodnoty rychlostí hned přiřadit. Proto tato nová funkce vypadá obdobně jako ta předchozí, ale funkcí se značně liší. Vytvořený kurzor už neslouží pro čtení, ale pro zápis nových hodnot do atributové tabulky. V hlavním souboru byly vytvořeny nové sloupce v atributové tabulce, kam se budou nové hodnoty zapisovat. Tyto nové atributy se jmenují *ftSpeed* a *tfSpeed*, které byly vytvořeny předchozí funkcí.

```
def addSpeeds(koef, finalLines):  
    with arcpy.da.UpdateCursor(finalLines, ["ftSpeed", "tfSpeed", "rychlost",  
        "intravilan", "SHAPE@"]) as cursor:
```

V prvním kroku funkce separuje všechny prvky nacházející se intravilánu a přidá jim hodnotu, která nastavena jako výchozí v proměnné `speedField`.

```
for row in cursor:  
    if row[3] == 1:  
        row[0] = row[2]  
        row[1] = row[2]  
        cursor.updateRow(row)  
        continue
```

Po separaci dat dle tohoto atributu si funkce vytvoří seznamy, které se posléze plní údaji, které se ve funkci vypočítají.

```
vArrayFT = []  
vArrayTF = []  
lenArray = []
```

Následuje obdobný postup jako u funkce `editLines` s tím rozdílem, že do algoritmu vstupuje sklon. Nejprve vybere linie, které mají pouze počáteční a koncový vertex, tedy pouze 2 vertexy a spočítá mezi nimi sklon. Pokud je sklon větší než 3 %, funkce přiřadí do nové proměnné hodnotu vyplývající z roviny definované v kapitole 2.6.2. Do druhé proměnné přiřadí originální hodnotu z proměnné `speedField`. V obou případech je zároveň ošetřena obousměrnost. To znamená, že se zápis týká i sklonu menší než -3 %.

```

slopeFT = (deltaZ / a) * 100
slopeTF = (-deltaZ / a) * 100
if slopeFT > 3:
    vft = v * (1 - koef * slopeFT)
else:
    vft = v
if slopeTF > 3:
    vtf = v * (1 - koef * slopeTF)
else:
    vtf = v
row[0] = vft
row[1] = vtf
cursor.updateRow(row)

```

Linií s více než třemi vertexy se týká obdobný postup jako v případě `editLines`. Nejdříve se vypočtou hodnoty křivolakosti a obvodu kružnice opsané a z těch se pak vypočte rychlost. Následuje výpočet sklonu. Cyklus bere v úvahu opět 3 po sobě jdoucí body a mezi prvním a třetím vypočítá sklon. Sklonu se týkají stejné restrikce jako v předchozím případě a jsou zde ošetřeny stejné problémy, které by mohly být způsobeny zápornou hodnotou sklonu. Pokud se jedná o kombinaci faktorů sklonu i křivolakosti, algoritmus nejprve vypočte rychlost v závislosti na křivolakosti a následně tuto hodnotu dosadí do rovnice (viz. kapitola 2.6.2) a tím simuluje vliv sklonu.

Na závěr jsou hodnoty dosazeny do vytvořených proměnných. Po zapsání do těchto proměnných je potřeba ještě spočítat vážený průměr hodnot, protože každý úsek je jinak dlouhý. V tomto případě je tedy jako váha použita délka komunikace. Na konci každého cyklu se seznamy vymažou a pro novou linii se zapisuje do nových.

```

vMeanFT = meanWght(lenArray, vArrayFT)
vMeanTF = meanWght(lenArray, vArrayTF)
row[0] = vMeanFT
row[1] = vMeanTF
cursor.updateRow(row)

```

Pro vypočítání vážených průměru bohužel v Pythonu neexistuje volně dostupná knihovna, tak bylo zapotřebí si tuto funkci naprogramovat. Jedná se o funkci `meanWght`, která pomocí cyklu pro každou linii spočítá její vážený průměr. V algoritmu je implementováno i omezení pro minimální rychlost na 20 km/h, to znamená, pokud by rychlost ve výpočtu klesla pod 20 km/h, algoritmus jí vrátí na minimální možnou (20 km/h).

```
def meanWght(lenArray, vArray):
    wghts = []
    mean = 0
    suma = sum(lenArray)
    for i in range(0, len(lenArray)-1):
        wghts.append(lenArray[i]/suma)
        mean = mean + vArray[i]*wghts[i]
    return mean
```

4.6.7. Výpočet času

Na závěr je do vytvořených atributů *ftTime*, *tfTime* a *avgTime* dopočítána hodnota času v minutách. Pro tento účel byla vytvořena samostatná funkce *addTime*, která každé linii dílčí linii dopočte hodnoty času. Čas byl dopočítán následující rovnicí:

$$ftTime(tfTime) = \frac{Shape_Length}{ftSpeed(tfSpeed)} \times 0.06$$

Atribut *avgTime* je pouhým aritmetickým průměrem hodnot *ftTime* a *tfTime*. Atribut byl vytvořen pro případ, kdyby uživatel nechtěl započítat vliv obousměrnosti ve svahu.

```
def addTime(finalLines):
    with arcpy.da.UpdateCursor(finalLines, ["ftSpeed", "tfSpeed", "Shape_Length", "ftTime",
"tfTime", "avgTime"]) as cursor:
        for row in cursor:
            row[3] = (row[2] / row[0]) * 0.06
            row[4] = (row[2] / row[1]) * 0.06
            row[5] = (row[3] + row[4]) / 2
            cursor.updateRow(row)
```

Na závěr skriptu je ještě definována funkce *deleteFiles*, která smaže veškeré mezi soubory, které byly v předchozích krocích vytvořeny.

4.7. Tvorba nástroje

Prostředí ArcGIS Pro podporuje tvorbu nástroje vytvořeného pomocí Python skriptu. To znamená, že mu umí vytvořit interaktivní uživatelské rozhraní pro jednodušší práci. Jako každý nástroj v prostředí ArcGIS i tento musí být uložen do *Toolboxu*. Posléze se připojí soubor s implementovaným skriptem a definují se vstupní parametry (viz. Obr. č. 14).

	Label	Name	Data Type	Type	Direction	Category	Filter	Dependency	Default	Environment	Symbology
0	Input Feat...	Input	Feature Cl...	Required	Input						
1	Output Da...	Output	Geodataset	Required	Output						
2	Output Na...	Name	String	Required	Input						
3	DEM Input	DEM_Input	Raster Dat...	Required	Input						
4	Speed Field	Speed_Field	Field	Required	Input			Input			
5	Intravilan...	Intravilan_Field	Field	Required	Input			Input			

Obr. č. 14: Parametry nástroje na ohodnocení vektorů

Po přidání vstupních parametrů, které vycházejí ze skriptu jako `arcpy.GetParameterAsText(X)`, byly přidány popisky a k jednotlivým parametrům a celkový popis nástroje (viz. Obr. č. 15).

Obr. č. 15: Náhled nástroje v prostředí ArcGIS Pro

4.8. Tvorba network datasetu

Do network datasetu vstupuje pouze jedna vrstva, která je výstupem z vytvořeného nástroje. Jako *Travel Mode* bylo zvoleno řízení (*Driving*) a jako náklady na cestu byl zvolen čas. U času byla nastavena obousměrnost podle *From-To* a *To-From* (viz. Obr. č. 16).

Evaluators			
	Source	Type	Value
Edges			
	lines_2 (Along)	Field Script	[ftTime]
	lines_2 (Against)	Field Script	[tfTime]

Obr. č. 16: Nastavení času dle směru

Následuje nastavení jednosměrnosti linií. Linie, které mají v atributu *Oneway_1* nastavenou jednosměrnost se stávají průjezdnými pouze ve směru *Start-Point -> End-Point*. Jednosměrnost definuje atribut *Oneway_1* hodnotou *FT* (From-To). Ve směru *Along* byla ponechána defaultní hodnota. Pokud však linie hodnotu *FT* obsahuje, bylo jí v *Restrictions* ve směru *Against* nastaveno následující:

```
restricted = False
Select Case UCase([Oneway_1])
  Case "N", "FT", "F": restricted = True
End Select
```

4.9. Zájmové území

Jako zájmové území, které bylo vybráno pro testování, je okolí měst Písek a Protivín (viz. Obr. č. 17). Na tomto území s nacházejí jak rovinaté úseky, tak úseky s větším výškovým členěním. V tomto regionu se nachází všechny typy silnic, kromě dálnic. Co se dálnic týče zkoumání jejich křivolakosti, je celkem bezpředmětné díky charakteru stavby



Obr. č. 17: Náhled zájmového území

5. Výsledky

Testování a validace vytvořeného algoritmu probíhalo pomocí internetových route plannerů a terénním šetřením. Bylo vytvořeno několik testovacích tras a to v drtivé většině mimo intravilán. Celé testování bylo rozděleno na 2 části. První, primární část byla provedena v zájmovém území popsaném v kapitole č. 4.8. V této primární části byly výsledky podpořeny i terénním šetřením. Druhá, sekundární část byla konfrontována pouze s výsledky internetových route plannerů a byl zde použit jiný zdroj dat k definici převýšení trasy. Během testování bylo najeto přes 1300 km.

5.1. Testovací trasy

Vytvořené testovací trasy byly vybrány podle třídy silnic, které se na nich vyskytují. Tyto testovací trasy byly následně konfrontovány s výsledky z route plannerů a výsledky, které vzešly z terénního šetření. Celkem bylo vytvořeno 8 tras pro testování, z nichž jedna byla vytvořena speciálně pro testování výpočtu času v kopcovatém terénu. Jedná se o různé kombinace třídy silnic (viz. Tab. č. 7).

Id	Trasa	Třída silnice	Délka
A	Písek - Protivín	I.	13.3 km
B	Temelín - Albrechtice n. V. - Záhoří	II.	22.8 km
C	Ražice - Protivín - Temelín	III.	21.1 km
D	Písek - Albrechtice n. V.	I. / II.	14.2 km
E	Písek - Ražice - Protivín - Temelín - Albrechtice n. V.	II. / III.	37.4 km
F	Písek - Protivín - Ražice	I. / III.	21.1 km
G	Písek - Protivín - Temelín - Albrechtice n. V.	I. / II. / III.	30.9 km
H	Písek - Dolní Novosedly	I.	3.1 km

Tab. č. 7: Trasy určené pro testování

Testování probíhalo za striktního dodržování pravidel silničního provozu. Nebyl proveden žádný předjížděcí manévr, při omezení rychlosti zákazovou značkou byla rychlost snížena ještě před tím, než vozidlo značku minulo (ne až potom, jako to bývá zvykem mnoha řidičů). Čas byl měřen pomocí stopek za asistence spolujezdce a ujetá vzdálenost byla měřena pomocí tachometru přímo ve vozidle.

5.1.1. Trasa A

Trasa A vede po silnici I. třídy číslo 20. Vytyčená trasa spojuje města Písek a Protivín (viz. Obr. č. 18). Jedná se o poměrně rušnou komunikaci. Dle sčítání dopravy z roku 2016 tímto úsekem projede cca 13000 aut denně (ŘSD 2016). Z tohoto důvodu bylo terénní šetření v tomto úseku provedeno o víkendu, kdy doprava není tak hustá. Celý úsek je poměrně rovný ve vertikálním (viz. Příloha č. 2) i horizontálním směru. Testovacích jízd bylo provedeno 9, přičemž při počítání průměru byla odstraněna nejrychlejší a nejpomalejší jízda. Celkem tedy 7 platných měření (viz. Příloha č. 1). Celková délka trasy byla 13.3 km z toho 11.78 km mimo intravilán (viz. Tab. č. 8) a z vyhodnocení terénního šetření vyšla průměrná doba jízdy 9 minut a 12 sekund (viz. Tab. č. 9).

	Celkem	Intravilán		Silnice		
		V	Vně	I. třída	II. třída	III. třída
Délka [km]	13.3	1.52	11.78	13.3	0	0
%	100%	11.43%	88.57%	100%	0.00%	0.00%

Tab. č. 8: Složení trasy A

Měření	Čas [min]
Algoritmus	9.71
Mapy.cz	10
Google Maps	9
Terénní šetření	9.20

Tab. č. 9: Výsledky měření trasy A



Obr. č. 18: Náhled trasy A

5.1.2. Trasa B

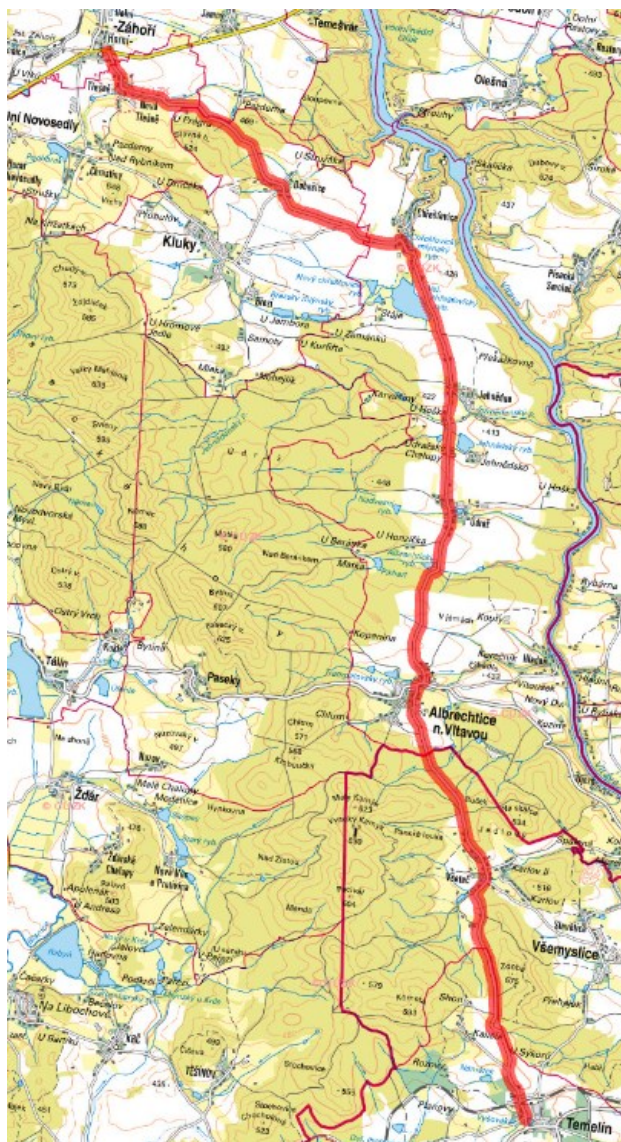
Trasa B byla určena k testování nastavení parametrů na silnicích druhé třídy. Trasa vede i několika malými obcemi a její délka je 22.8 km (viz. Obr. č. 19). Jedná se o velmi málo vytíženou cestu, neboť zde denně v nejvytíženějším úseku projede 559 aut (ŘSD 2016). Oproti trase A, která byla ve vertikálním směru poměrně nevychýlená, tato trasa je více vertikálně členěna (viz. Příloha č. 4). Testovacích jízd pro tento úsek bylo provedeno 6 a opět byla odstraněna nejrychlejší a nejpomalejší jízda (viz. Příloha č. 3). Terénním šetřením bylo zjištěno, že průměrná doba jízdy tímto úsekem trvá 25 minut a 9 sekund (viz. Tab. č. 11).

	Celkem	Intravilán		Silnice		
		V	Vně	I. třída	II. třída	III. třída
Délka [km]	22.8	3.29	19.51	22.8	0	0
%	100%	14.43%	85.57%	100%	0.00%	0.00%

Tab. č. 10: Složení trasy B

Měření	Čas [min]
Algoritmus	27.72
Mapy.cz	26
Google Maps	23
Terénní šetření	25.15

Tab. č. 11: Výsledky měření trasy B



Obr. č. 19: Náhled trasy B

5.1.3. Trasa C

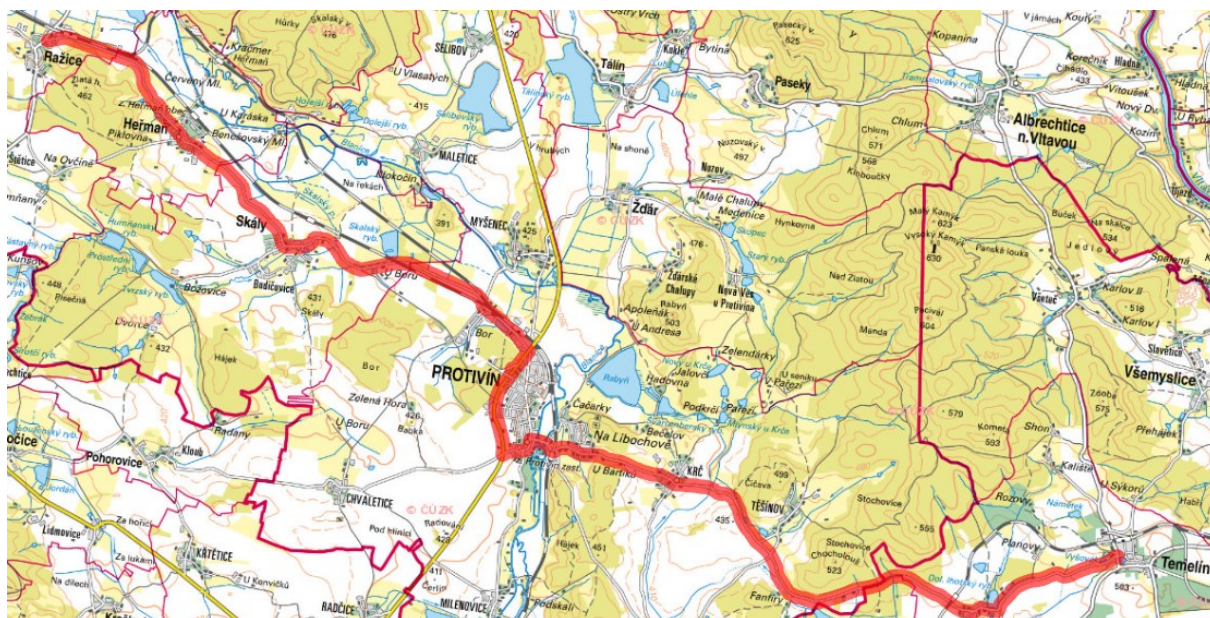
Trasa C o délce 21.1 km byla vytvořena především pro testování nastavení parametrů u silnic třetí třídy (viz. Obr. č. 20). Trasa vede přes mnoho menších obcí, proto se její čtvrtina nachází v intravilánu (viz. Tab. č. 12), to je způsobeno tím, že silnice třetí třídy se primárně nestaví jako obchvaty obcí, nýbrž jako průtahy. Údaje o intenzitě provozu nejsou v ŘSD dostupné, neboť se zde sčítání dopravy neprovádělo. Testovacích jízd v tomto úseku bylo provedeno 7 a opět se nejrychlejší a nejpomalejší jízda nezapočítala. První polovina trasy (Ražice – Protivín) je užší než druhá polovina trasy (Protivín – Temelín). Záznam měření a výškový profil tras jsou součástí příloh číslo 5 a 6.

	Celkem	Intravilán		Silnice		
		V	Vně	I. třída	II. třída	III. třída
Délka [km]	21.1	5.52	15.58	1.72	0	19.38
%	100%	26.16%	73.84%	8.15%	0.00%	91.85%

Tab. č. 12: Složení trasy C

Měření	Čas [min]
Algoritmus	30.43
Mapy.cz	32
Google Maps	25
Terénní šetření	28.7

Tab. č. 13: Výsledky měření trasy C



Obr. č. 20: Náhled trasy C

5.1.4. Trasa D

Trasa D je první kombinovanou trasou. Jde o silnice první a druhé třídy o celkové délce 14.2 km (viz. Obr. č. 21). Jedná se o trasu mezi Pískem a Albrechticemi nad Vltavou. První polovina trati vede po horizontálně i vertikálně rovné silnici první třídy a druhá polovina vede po silnici druhé třídy, která je výrazněji vertikálně členěna (viz. Příloha č. 8). Intenzita provozu na druhé polovině trati je dle sčítání dopravy z roku 2016 2300 aut denně (ŘSD 2016). Testovacích jízd v tomto úseku bylo provedeno 8, z toho 6 bylo platných (opět nejrychlejší a nejpomalejší nezapočítána). Průměrný čas jízdy byl 14 minut 12 sekund (viz. Tab. č. 15).

	Celkem	Intravilán		Silnice		
		V	Vně	I. třída	II. třída	III. třída
Délka [km]	14.2	2.37	11.83	3.81	10.39	0
%	100%	16.69%	83.31%	26.83%	73.17%	0.00%

Tab. č. 14: Složení trasy D

Měření	Čas [min]
Algoritmus	15.02
Mapy.cz	15
Google Maps	13
Terénní šetření	14.2

Tab. č. 15: Výsledek měření trasy D



Obr. č. 21: Náhled trasy D

5.1.5. Trasa E

U trasy E se jedná o kombinaci silnic druhé a třetí třídy. Rovněž se jedná o nejdelší testovací trasu, neboť právě v bakalářské práci (Černický 2018) byla největší odchylka právě na těchto silnicích. Trasa je dlouhá 37.4 km. V tomto případě bylo provedeno 6 testovacích jízd a započítány byly opět jen 4. Průměrný čas jízdy tímto úsekem byl 40 minut a 54 sekund (viz. Tab. č. 17). První polovina trati se vyskytuje v poměrně rovinném terénu, zatím co druhá polovina je kopcovitějšího rázu (viz. Příloha č. 10).

	Celkem	Intravilán		Silnice		
		V	Vně	I. třída	II. třída	III. třída
Délka [km]	37.4	8.04	29.36	1.79	14.65	20.96
%	100%	21.50%	78.50%	4.79%	39.17%	56.04%

Tab. č. 16: Složení trasy E

Měření	Čas [min]
Algoritmus	44.62
Mapy.cz	47
Google Maps	37
Terénní šetření	40.9

Tab. č. 17: Výsledky měření trasy E



Obr. č. 22: Náhled trasy E

5.1.6. Trasa F

Trasa F je kombinací silnic první a třetí třídy o délce 21.1 km (viz. Obr. č. 23). Vertikální členitost této trasy je poměrně malá (viz. Příloha č. 12). Ve druhé polovině trasy se nachází vyšší množství obcí. Proto se 16.45 % trasy nachází v intravilánu (viz. Tab. č. 18). Sčítání dopravy probíhalo pouze na silnici první třídy, tedy cca 13000 aut denně (ŘSD 2016), proto probíhalo testování v sobotu, aby se eliminoval vliv tohoto proměnlivého faktoru na minimum. Pro tuto trasu bylo provedeno 7 testovacích jízd, kde opět bylo započítáno pouhých 5. Průměrný čas jízdy byl 21 minut a 39 sekund (viz. Tab. č. 19).

	Celkem	Intravilán		Silnice		
		V	Vně	I. třída	II. třída	III. třída
Délka [km]	21.1	3.47	17.63	10.68	0	10.42
%	100%	16.45%	83.55%	50.62%	0.00%	49.38%

Tab. č. 18: Složení trasy F

Měření	Čas [min]
Algoritmus	22.19
Mapy.cz	23
Google Maps	20
Terénní šetření	21.65

Tab. č. 19: Výsledky měření trasy F



Obr. č. 23: Náhled trasy F

5.1.7. Trasa G

Trasa G je kombinací všech tříd silnic a je dlouhá 30.9 km. Trasa v prvních dvou třetinách ve vertikálním směru poměrně rovná. V poslední třetině však vede kopcovatějším terénem (viz. Příloha č. 14). Z celkové trasy se 4.61 km (14.92 %) nachází v intravilánu. Nejmenší podíl zastoupení mají silnice druhé třídy (22.78 %) (viz. Tab. č. 20). Jelikož se jedná o různorodý mix silnic, intenzita dopravy je zde velmi rozdílná. Testovacích jízd bylo provedeno 6 s průměrným časem 29 minut a 51 sekund (viz. Tab. č. 21).

	Celkem	Intravilán		Silnice		
		V	Vně	I. třída	II. třída	III. třída
Délka [km]	30.9	4.61	26.29	12.33	7.04	11.53
%	100%	14.92%	85.08%	39.90%	22.78%	37.31%

Tab. č. 20: Složení trasy G

Měření	Čas [min]
Algoritmus	31.50
Mapy.cz	35
Google Maps	28
Terénní šetření	29.85

Tab. č. 21: Výsledky měření trasy G



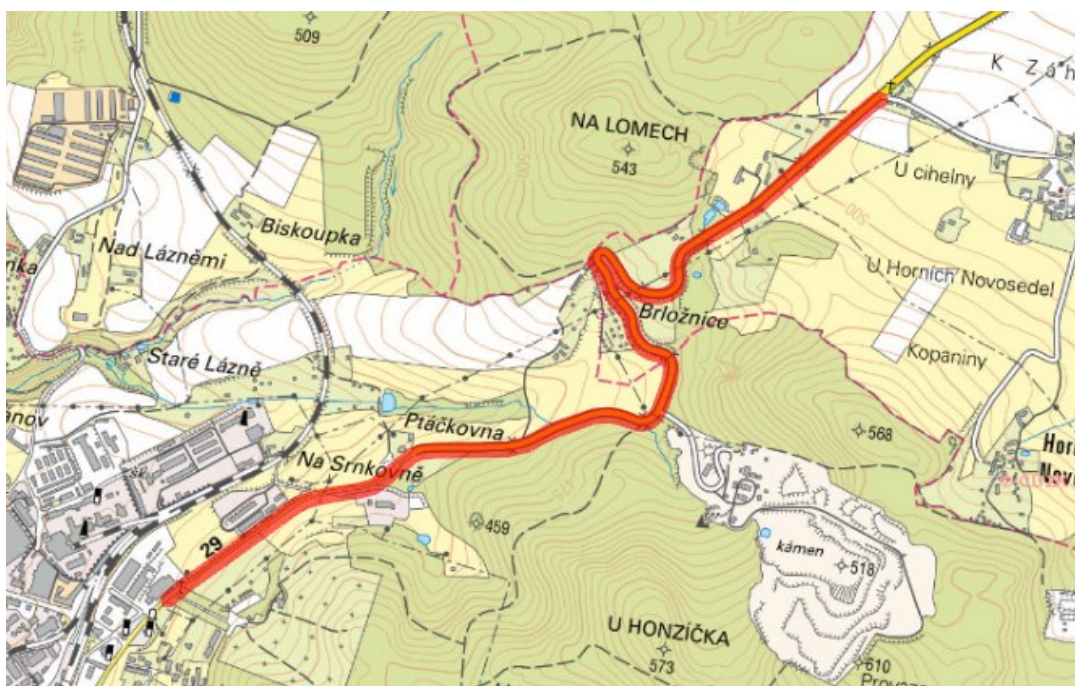
Obr. č. 24: Náhled trasy G

5.1.8. Trasa H

Trasa H byla speciálně navržena pro testování výpočtu rychlosti v úsecích vedoucích do kopce nebo z kopce. Jedná se o 3.1 km dlouhý úsek, který místy přesahuje 3% převýšení. V tomto případě bylo terénní šetření poněkud komplikovanější, neboť bylo potřeba udělat daleko větší množství testovacích jízd. Rozdíl v čase na trase do kopce a skopce činil při použití ArcGIS Pro 4 sekundy a 52 setin sekundy (viz. Tab. č. 22). Tento minimální rozdíl by nebylo možno zjistit pomocí několika málo jízd, proto bylo v tomto případě provedeno 32 testovacích jízd v každém směru, celkem tedy 64 (viz. Příloha č. 15 a 16). Z 32 testovacích jízd byly vždy odstraněny 3 nejrychlejší a 3 nejpomalejší měření. Celkem tedy do výpočtu průměru vstoupilo 26 platných měření. Testování pomocí route plannerů bylo v tomto případě zbytečné, neboť zaokrouhlují čas na celé minuty a v tomto případě je i přesnost na sekundy poměrně nízká. Testování proběhlo s pomocí spolujezdce, aby měření probíhalo co nejpresněji.

Měření	čas [min] - nahoru	čas [min] - dolů
Algoritmus	3.252	3.181
Terénní šetření	3.146	3.086

Tab. č. 22: Výsledky měření trasy H



Obr. č. 25: Náhled trasy H

5.2. Souhrn výsledků

Z terénního šetření a výsledků z route plannerů vyplývá, že vytvořený algoritmus, který počítá průjezdní rychlosti, poměrně dobře kopíruje zjištěné dojezdové časy. Terénní šetření rovněž ukázalo, že oproti výsledkům z Google Maps byly dojezdové časy pomalejší, zatímco v porovnání se serverem Mapy.cz byly dojezdové časy zjištěné v terénním šetření rychlejší.

Nejmenší odchylky vycházejí u tras, které vedou alespoň částečně po silnici první třídy. Tedy trasy A, D a F. Největší odchylku naopak zaznamenaly trasy B a E, kde došlo k největšímu zpoždění na kilometr. Jedná se o trasy, které z nějaké části vedou po silnicích druhé třídy a často vedou intravilánem.

U trasy B rovněž došlo k překročení dojezdového času v porovnání s Mapy.cz. Překročení bylo zaznamenáno i v případě trasy D, ale jelikož server neposkytuje podrobnější údaje o čase než zaokrouhlení na celé minuty, je tento přesah (0.02 minuty) zanedbatelný. Co se týče trasy D, odchylka v terénním šetření je poměrně malá.

Celkově lze tedy říct, že výpočet času za pomoci vytvořeného algoritmu vyšel relativně přesně u všech tras, kromě trasy B. Nejlépe pak u tras A, D a F, s tím že trasa F dosahuje úplně nejlepších výsledků. Trasy C, E a G vyšly poměrně přesně ovšem výpočet času se na kilometr zpožďuje více než u tras A, D a F (vice viz. Kapitola 7). U trasy B dochází k největšímu zpožďování na kilometr a výsledek se nedá považovat za uspokojivý.

Trasa	ArcGIS	Mapy.cz		Google Maps		Terénní šetření		Délka [km]
A	9.71	10	-0.29	9	0.71	9.2	0.51	13.3
B	27.72	26	1.72	23	4.72	25.15	2.57	22.8
C	30.43	32	-1.57	25	5.43	28.7	1.73	21.1
D	15.02	15	0.02	13	2.02	14.2	0.82	14.2
E	44.62	47	-2.38	37	7.62	40.9	3.72	37.4
F	22.19	23	-0.81	20	2.19	21.65	0.54	21.1
G	31.5	35	-3.5	28	3.5	29.85	1.65	30.9

Tab. č. 23: Souhrnné výsledky

Terénní šetření a validace výsledků na trase H, která byla navržena speciálně pro hodnocení přesnosti výpočtu v kopcovatém terénu, bylo prováděno odlišným způsobem než v případě prvních sedmi tras. Důraz byl kladen především na rozdíl dojezdových časů v opačných směrech než na rozdíl celkových časů mezi výsledky z ArcGIS a terénním šetřením.

Rozdíl v čase na takto krátkém úseku dosahoval jen několika jednotek sekund. V případě cesty nahoru se dojezdový vypočtený v ArcGIS oproti terénnímu šetření zpožďoval o 6.36 sekundy. V případě cesty dolů se výsledný čas zpožďoval o 5,7 sekundy. Rozdíl mezi cestou nahoru a dolů se v prostředí ArcGIS lišil o 4.26 sekundy a v případě terénního šetření o 3.6 sekundy. Celkově se tedy rozdíl časů mezi cestou nahoru a dolů lišil o pouhých 0.66 sekundy. (viz. Tab. č. 24).

	ArcGIS [min]		Terenní šetření [min]		Rozdíl [s]	
	nahoru	dolu	nahoru	dolu	nahoru	dolu
Trasa H	3.252	3.181	3.146	3.086	-6.36	-5.7
Rozdíl	4.26 s		3.6 s		-0.66 s	

Tab. č. 24: Souhrn výsledků na trase H

U sekundárního testování (viz. kapitola č. 6.1.1) došlo k porovnání výsledků mezi route plannery a výsledky z bakalářské práce (Černický 2018). V tomto případě nebylo možné konfrontovat výsledky s terénním šetřením z důvodu jeho absence. Jako hlavní výsledek z tohoto měření byla vzata v úvahu modrá trasa, která vede po stejných cestách jako výsledky z route plannerů. Oproti výsledkům z bakalářské práce (BP) se čas dojezdu snížil o 14.33 minut, respektive o 8.09 (výsledek druhého měření v bakalářské práci). Bakalářská práce zde vykazovala velké nepřesnosti. Po aplikaci algoritmu došlo však k velkému zpřesnění. Oproti route plannerů je odchylka již v řádech minut (viz. Tab. č. 25).

Trasa	ArcGIS	BP	Google Maps	Mapy.cz
modrá	55.71	70.04 (63.8)	52	57
červená	53.62			
Rozdíl (modrá)	-	-14.33 (-8.09)	3.71	-1.29

Tab. č. 25: Souhrn výsledků sekundárního testování

Červená trasa byla v prostředí ArcGIS spočítána jako nejrychlejší a oproti modré trase je tedy rychlejší zhruba o 2 minuty. V případě Google Maps je podobná trasa však o minutu pomalejší. Tyto drobné rozdíly by bylo vhodné podrobit terénnímu šetření.

6. Diskuse

Výsledky testování závisí na výchozích vstupních atributech a na algoritmu, který s nimi pracuje. Jedná se o novou metodu počítání nejlevnější trasy, která vychází z rovnice definované v ČSN 73 6101. Cílem práce bylo, vytvoření funkčního algoritmu na automatické ohodnocování dopravní sítě pomocí Pythonu. Výstupem je funkční nástroj pro ArcGIS Pro.

6.1. Validace průjezdných rychlostí

Funkčnost algoritmu konfrontována s výsledky s route plannerů na osmi testovacích trasách, které bylo rovněž podpořeno terénním šetřením. Jakou route plannery byly použity Mapy.cz a Google Maps. Přesto, že se jednalo o stejné trasy oba route plannery měly odlišné výsledky v řádu minut, v závislosti na délce trasy. Tyto hodnoty lze pojmout jako jakýsi interval, do kterého by se algoritmus měl svým výpočtem trefit. Navíc výsledky z terénního šetření tyto dojezdové časy dobře kopírují.

Ze sedmi tras (A až G) vyšel čas spočítaný algoritmem v pěti případech ve zmíněném intervalu a u jedné trasy a jeho hranici. V případě trasy B byl čas spočítaný algoritmem mimo zmíněný interval. Tato nepřesnost byla způsobena vedením trasy v intravilánu, kde byla dosazena nižší průjezdní rychlost, než jaká byla opravdová.

Průjezdní rychlosti v intravilánu byly nastaveny dle výsledků z práce Černický (2018). Ta ze svých výsledků deklaruje, že nastavené průjezdní rychlosti jsou vhodné pro intravilán, neboť při jejich testování nebyly odhaleny větší nepřesnosti. V této práci však nebyly testovány průtahy obcí, které jsou sice vedeny jako intravilán, ale u menších obcí se bez omezení projede průměrnou rychlostí 50 km/h. V těchto případech v modelu vzniká zpoždění, stejně jako na trase B. Proto by bylo v budoucna uvažovat o modelu, který by uměl počítat rychlosti v intravilánu vhodnějším způsobem.

Rychlosti v extravilánu však algoritmus spočítal lépe než v bakalářské práci (Černický 2018) a je důkazem toho, že pokud se vezme v úvahu křivolakost komunikace, tak je model přesnější. Ke stejnému závěru došel rovněž Bartoš (2012).

Co se týče výsledků na trase H, zde lze deklarovat, rozdíl v časech při jízdě nahoru a dolů se příliš neliší. Jak algoritmus tak terénní šetření vykazují podobné rozdíly při cestě nahoru a dolů. Celkový čas jízdy, který vychází z terénního šetření, je však o několik sekund nižší.

Použití rovnice z ČSN 73 6101 bylo při využití křivolakosti vhodné a přineslo zlepšení výsledku. Stejně tak nastavení zpomalení v kopcovatém terénu dle Reut, Shlomo, Abishai (2018), lze považovat za vhodné a rovněž přinesla zpřesnění výpočtu.

6.1.1. Porovnání výsledků

V bakalářské práci (Černický 2018) byla testována trasa z Jindřichova Hradce do Českých Velenic. Na této trase byly odhaleny značné nedostatky, neboť dojezdový čas se oproti route plannerů lišil až o 15 minut. Proto byla tato trasa spočítána i pomocí vytvořeného algoritmu.

Pro toto testování byla využita stejná síť jako v případě primárního testování se stejně nastaveným datasetem a průjezdními rychlostmi. Jako digitální model terénu byly využity vrstevnice ze ZABAGED, které byly přetransformovány do rasteru o velikosti 2 x 2 metry. Ve zmíněné bakalářské práci bylo deklarováno, že by bylo do budoucna vhodné zahrnout i příhraniční síť sousedících států. V tomto případě tak však učiněno nebylo, neboť konkrétně na rakouských silnicích platí jiné dopravní předpisy a jsou tam jiné normy pro stavbu silnic. I když použitá rovnice, by mohla být teoreticky využita i na jiných silnicích v jiných státech.

Testovány byly 2 trasy. Pro první trasu byly zavedeny pouze 2 body (začátek a konec). Pro druhou trasu byly zavedeny 3 body a to tak, aby trasa vedla celou dobu po silnici první třídy. Výsledky jsou shrnuty v tabulce č. 26.

Trasa	Čas [min]
Algoritmus – červená	53.62
Algoritmus – modrá	55.71
Google Maps – optimální	52
Mapy.cz - optimální	57

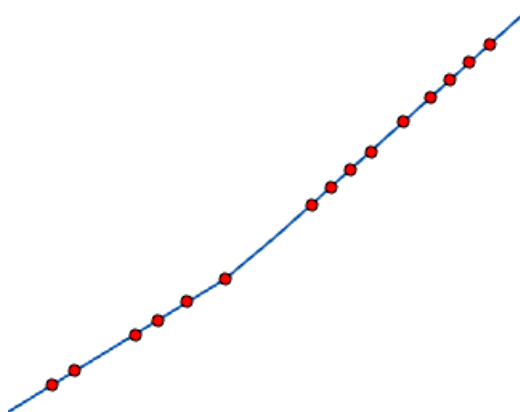
Tab. č. 26: Výsledky sekundárního testování



Obr. č. 26: Náhled tras pro sekundární testování

6.2. Funkčnost skriptu

Vytvořený nástroj dokáže modifikovat výchozí silniční síť a spočítat pravděpodobné průjezdní rychlosti. V geometrii sítě však provádí více dělení, než je očekáváno. Skript by neměl dělit linii na úsecích, kde se nemění průjezdní rychlost. Bohužel tomu tak není a skript dělí linii i na úsecích, které jsou zcela rovné, tudíž by v nich nemělo docházet k dělení (viz. Obr. č. 27).



Obr. č. 27: Dělicí body na linii

Tato skutečnost však nemá na výsledek žádný vliv, neboť dosazené průjezdní rychlosti v atributové tabulce jsou dosazeny správně. Zvyšuje se tím však počet dílčích linií v souboru. Tento problém jsem bohužel nedokázal odstranit.

Ve skriptu je zavedena funkce *Dissolve*. Nevýhodou této funkce je, že může sjednotit různé třídy silnic. Avšak těchto případů je velice málo, protože třída silnice se s absencí křižovatky povětšinou nezmění. Dalším problémem je sjednocení linií na pomezí intravilánu a extravilánu. Tento problém je ošetřen tím, že do tohoto sjednocování vstupují pouze silnice, které se nenacházejí v intravilánu (hodnota atributu *intravilan* = 0).

Další nevýhodou skriptu je, že v něm probíhají dvě velmi podobné operace dvakrát. Tím se zvyšuje potřebný čas pro výpočet. Problém tkví v tom, že v první fázi dělení linií se berou line od první k poslední. Po rozdělení linií se však pořadí linií mění a již jednou spočítané hodnoty křivolakosti, které jsou uloženy v seznamu, jsou náhle v jiném pořadí než linie a nelze je přiřadit. Musejí se tedy spočítat znovu.

7. Závěr

Hlavním cílem této práce byla tvorba funkčního nástroje, který dokáže dle implementovaného algoritmu ohodnocovat průjezdní rychlosti v silniční síti. Průjezdní rychlost byla ohodnocována v zatáčkách a stoupáních větších než 3 %. V práci je rovněž kladen důraz na testování funkčnosti nástroje pomocí testovacích tras, které bylo podpořeno terénním šetřením. Pro vypočtení křivolakosti směrového oblouku je v práci vysvětlen a použit pokročilý matematický výpočet.

Algoritmus byl implementován v prostředí Python. Celý skript, který byl pojmenován jako *Line Evaluator*, byl nahrán jako nástroj do prostředí ArcGIS Pro. Sestává se ze dvou dílčích souborů, které dohromady čítají bezmála skoro 300 řádků. Nástroj pracuje kromě silniční sítě rovněž s digitálním modelem terénu, který vertexům linie dosadí souřadnici Z. Výpočet křivolakosti byl založen na rovnici, která je stanovena v ČSN 73 6101 (2018) Projektování silnic a dálnic. Dle této rovnice algoritmus počítá, jaké zpomalení nastane v zatáčkách. Z výsledků studie Reut, Shlomo, Abishai (2018) byla vytvořena rovnice popisující zpomalení v kopcích.

Na základě testování lze konstatovat, že skript přinesl zlepšení výpočtu dojezdového času než v předchozí bakalářské práci (Černický 2018), kde byly pevně nastaveny rychlosti za pomoci odborné literatury. To, že použití křivolakosti zlepší výpočet času, konstatovali již i jiní autoři, např. Bartoš (2012). Samostatně testován byl i faktor sklonu, který dosud nebyl zkoumán a řešen v kombinaci s křivolakostí. Výsledky ukazují, že vliv sklonu přináší určité zpřesnění. Z testování plyne, že na úseku dlouhém cca 3 km, který vyšší míru sklonitosti, bylo pozorováno zpřesnění. Konkrétně se jedná o zpomalení při cestě nahoru. Algoritmus spočítal 4,26 sekundy, dle terénního šetření vyšlo 3,6 sekundy. Vytvořený nástroj tedy dokázal zpřesnit výpočet času a zahrnul do něj jak křivolakost, tak i vliv reliéfu. Nástroj tedy zohledňuje obě tyto charakteristiky, což předtím nikdo dosud nekombinoval. Vytvořený algoritmus je aplikovatelný do prostředí ArcGIS Pro a je ke stažení na této adrese:

Do budoucna by bylo vhodné zaměřit se na intravilán. Vytvořit algoritmus, který by dokázal propočítat zdržení na semaforech, přechodech pro chodce, přednostech v jízdě atd. K tomu by však bylo zapotřebí velké množství dat, jako jsou například intervaly semaforů. V současné době již, ale existují pokročilejší metody počítání dojezdového času, tyto metody se opírají o data z mobilních telefonů, které poskytují přesné informace o intenzitě a rychlosti provozu. Bez těchto dat, lze jen těžko očekávat výraznější posun vpřed v tomto odvětví geoinformatiky.

8. Zdroje

8.1.Literární zdroje

- ARAI, S., ISHIKAWA, S. (2016): Evaluating Advantage of Sharing Information among Vehicles toward Avoiding Phantom Congestion Generalized Nagel-Schreckenberg Model. Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 31, 2, D1 - D8.
- ARCDATA PRAHA (2016): ArcČR 500 Verze 3.3, Digitální geografická databáze 1 : 500 000. http://download.arcdata.cz/data/ArcCR_500-3.3-Popis-dat.pdf (11. 4. 2020).
- BARTOŠ, J. (2012): Deviatilita komunikací v síťových analýzách s využitím GIS. Diplomová práce. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Praha.
- BORŮVKA, O. (1926): O jistém problému minimálním. Práce Moravské přírodovědecké společnosti, 3, 3, 37-58.
- BRINKE, J. (1999): Úvod do geografie dopravy. 1. vyd. Karolinu, Praha.
- BULAI, M., URSU, A. (2012): Creating, testing and applying a GIS road travel cost model for Romania. Geographia Technica, 7, 1, 8 - 18.
- CAPALDO, F. S. (2007): Speed analysis on urban roads. University Federico II of Naples, Neapol.
- ČERNICKÝ, D. (2018): Hodnocení dopravní dostupnosti zdravotní péče v Česku v GIS na příkladu kardiologire. Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Praha.
- ČERNÝ, J. (2010): Základní grafové algoritmy. Skripta Mff, Praha.
- ČSN 73 6100 - 1 (2008): Názvosloví silničních komunikací: Část: Základní názvosloví. Český normalizační institut, Praha.
- ČSN 73 6101 (2004): Projektování silnic a dálnic. Český normalizační institut, Praha.
- ČSN 73 6101 (2018): Projektování silnic a dálnic. Český normalizační institut, Praha.
- ČSN 73 6102 ed. 2 (2007): Projektování křižovatek na místních komunikacích. Český normalizační institut, Praha.
- DIAL, R. B. (1969): Algorithm 360: Shortest-path forest with topological ordering. Communications of the ACM, 12, 11, 632 - 633.
- DURAN-FERNANDEZ, R., SANTOS, G. (2014): A GIS Model of the National Road Network in Mexico. Research in Transportation Economics, 46, 1, 36 - 54.

- ESRI (2020): How Topo to Raster works. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-topo-to-raster-works.htm> (21. 5. 2020)
- HAVEL, V. (1955): Poznámka o existenci konečných grafů. Časopis pro pěstování matematiky, 80, 4, 477-480.
- HAYNES, R., JONES, A., SAUERZAPF, V., ZHAO, H. (2006): Validation of travel times to hospital estimated by GIS. International Journal of Health Geographics, 5, 40.
- HOLCNER, P. (2005): Pozemní komunikace I. Trasa pozemních komunikací. Vysoké učení technické v Brně, Brno.
- HUDEČEK, T. (2008): Model časové dostupnosti individuální automobilovou dopravou. Geografie, 113, 2, 140–153.
- HUDEČEK, T. (2010): Dostupnost v Česku v období 1991-2001: Vztah k dojížděcí do zaměstnání a do škol. ČGS, Praha.
- KRÁL, D., MAREŠ, M., ŠKODA, P. (2013): Haldy, heapsort a Dijkstrův algoritmus. <http://ksp.mff.cuni.cz/kucharky/halda-a-cesty/> (12. 4. 2019).
- LOUTHAN, M., SVOBODOVÁ, J., HEISING, J. (2010): Vybrané parametry ovlivňující rychlost automobilové dopravy v prostředí GIS. Perner's Contacts, 3, 3, 165 - 173.
- LOUTHAN, M. (2010): Vztah digitálního modelu reliéfu a síťových analýz pro řešení dopravních úloh. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc.
- MELCHOR, Ó. M., LUCAS-ALBA, A., FERRUZ, A. B., BLANCH, M. T., MARTÍN-ALBO, J. (2018): The WaveDriving Course. Transportation Research Procedia, 33, 179-186.
- MILKOVÁ, E. (2000): Moderní pohled na "jistý problém minimální". Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, 45, 4, 265-273.
- NOVINKY.CZ (2020): Umělec potrápil řidiče. V Berlíně vytvořil falešnou zácpu. <https://www.novinky.cz/internet-a-pc/mobil/clanek/umelec-potrapil-ridice-v-berline-vytvoril-falesnou-zacpu-40312236> (20. 4. 2020).
- PAVLÍČEK, J., RADIMSKÝ, M. (2011): Projektování silnic a dálnic. Dům techniky Pardubice, Brno.
- PENG, J., ZHENNING, D., YUJING, W., YUELONG, S., ZHIHENG, L. (2018): Empirical Study of Phantom Traffic Jams on Urban Expressway. 2018 Ninth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), 99-102. Wanzhou.
- PEŇÁZ, T. (2006): Síťové analýzy v prostředí GIS. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Ostrava.

- PEŇÁZ, T. (2005): Zpřesnění liniového dopravního modelu sítě silničních komunikací pro účely analýzy dopravní dostupnosti. Sborník z konference GIS Ostrava, 14.
- QGIS (2020): A gentle Introduction to GIS - Vector Data.
https://docs.qgis.org/3.10/en/docs/gentle_gis_introduction/vector_data.html (16. 7. 2020).
- RADIMSKÝ, M., MATUSZKOVÁ, R. (2016): Revize ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic. http://silnicniseminar.cz/files/16_Radimsky_Zm-ny-v--SN-73-6101---umis-ovani-svodidel.pdf (17. 4. 2020).
- RAPANT, P. (2002): Úvod Do Geografických Informačních Systémů. HGF VŠB-TU, Ostrava.
- REUT, S., SHLOMO, B., ABISHANI, P. (2018): Speed variation for different drivers, situations, and road geometry: Simulator and survey analysis. *Journal of Transportation Safety & Security*, 10, 1-2, 25-44.
- ŘSD (2016): Celostátní sčítání dopravy 2016, Sčítání dopravy 2016, <http://scitani2016.rsd.cz> (4. 4. 2020).
- SEIDENGLANZ, D. (2007): Základní pojmy a koncepty v geografii dopravy.
https://is.muni.cz/el/1431/jaro2007/Z0041/3570611/Doprava_-_koncepty_a_pojmy__final__A_.pdf (12. 4. 2020).
- ŠEDA, M. (2003): Teorie grafů. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky, Brno.
- ŠIŠMA, P. (1997): Teorie grafů 1736 - 1963. Prometheus, Brno.
- VALLA, V., MATOUŠEK, J. (2008): Kombinatorika a grafy I.. Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy, Praha.
- VELHARTICKÝ, D. (2007): Analýzy nad vektorovou sítí.
http://old.gis.zcu.cz/studium/apa/referaty/2006/Velharticky_AnalyzyNadVektorovouSiti/??? (12. 4. 2019).
- WEST, D. B. (1996): Introduction to Graph Theory. Prentice-Hall, New Jersey.

8.2.Zdroje dat

ČUZK (2018): Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G). [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(514z0sqikh4nry1dbkxer4yz\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302](https://geoportal.cuzk.cz/(S(514z0sqikh4nry1dbkxer4yz))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302) (31. 5. 2020)

OpenStreetMap (2019): Silniční síť Česka, <https://www.openstreetmap.org/> (16. 12. 2019).

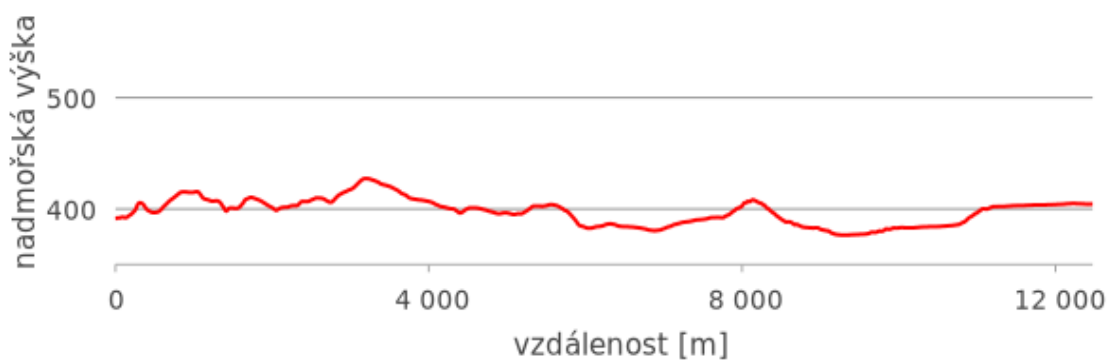
OpenStreetMap (2020): Topographic Basemap, https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/Specialty/DeLorme_World_Base_Map/MapServer (17. 4. 2020).

9. Přílohy

Příloha č. 1: Záznam měření trasy A

Jízda	Čas	Platné	Poznámky
1	0:09:22	X	déšť
2	0:09:59		déšť, pomalu jedoucí kamion
3	0:08:50		déšť
4	0:09:10	X	
5	0:08:57	X	
6	0:09:23	X	
7	0:09:13	X	
8	0:09:05	X	
9	0:09:16	X	déšť

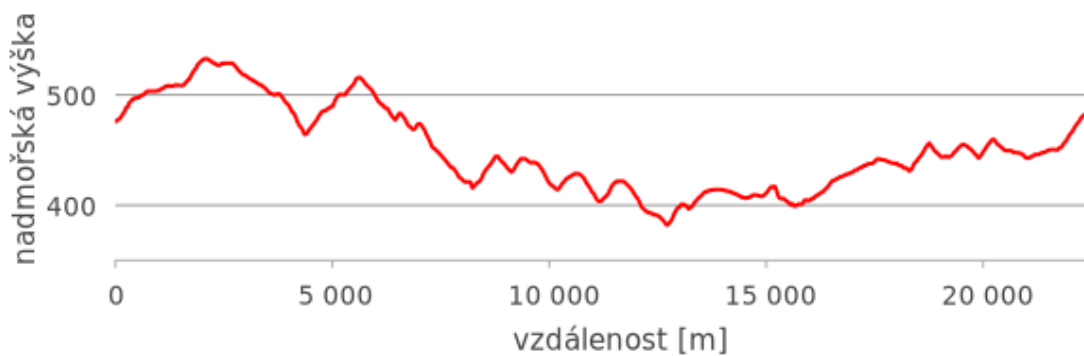
Příloha č. 2: Výškový profil trasy A



Příloha č. 3: Záznam měření trasy B

Jízda	Čas	Platné	Poznámky
1	0:25:27	X	déšť
2	0:24:49	X	
3	0:24:31		déšť
4	0:26:16		
5	0:25:35	X	sanitka v protisměru
6	0:25:08	X	

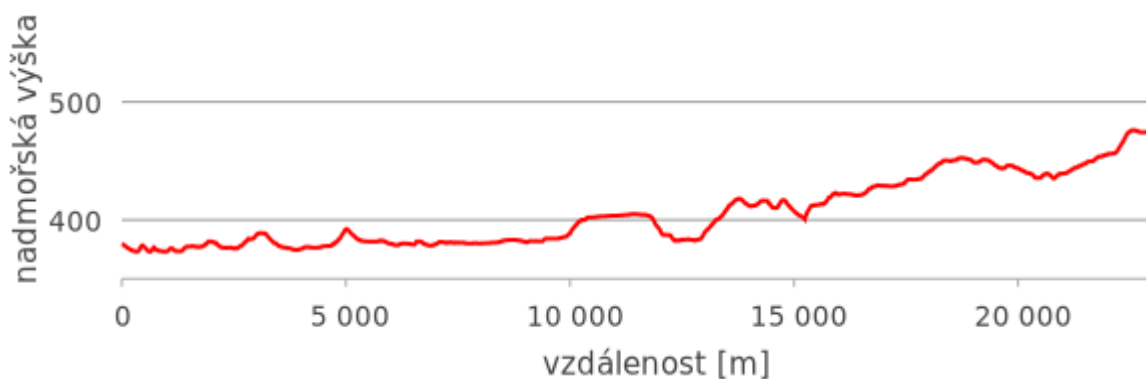
Příloha č. 4: Výškový profil trasy B



Příloha č. 5: Záznam měření trasy C

Jízda	Čas	Platné	Poznámky
1	0:28:00		
2	0:28:25	X	delší čekání na přednosti v jízdě
3	0:28:38	X	
4	0:28:17	X	
5	0:29:38		delší čekání na přednosti v jízdě, traktor, déšť
6	0:29:12	X	déšť
7	0:28:59	X	

Příloha č. 6: Výškový profil trasy C



Příloha č. 7: Záznam měření trasy D

Jízda	Čas	Platné	Poznámky
1	0:14:14	X	déšť
2	0:14:07	X	déšť
3	0:13:57	X	
4	0:13:40		
5	0:14:40	X	
6	0:14:22	X	
7	0:14:59		pomalou jedoucí vozidlo
8	0:13:54	X	

Příloha č. 8: Výškový profil trasy D



Příloha č. 9: Záznam měření trasy E

Jízda	Čas	Platné	Poznámky
1	0:40:03		
2	0:41:18	X	
3	0:40:29	X	
4	0:40:42	X	
5	0:41:49		delší čekání na přednosti v jízdě, déšť
6	0:41:06	X	déšť

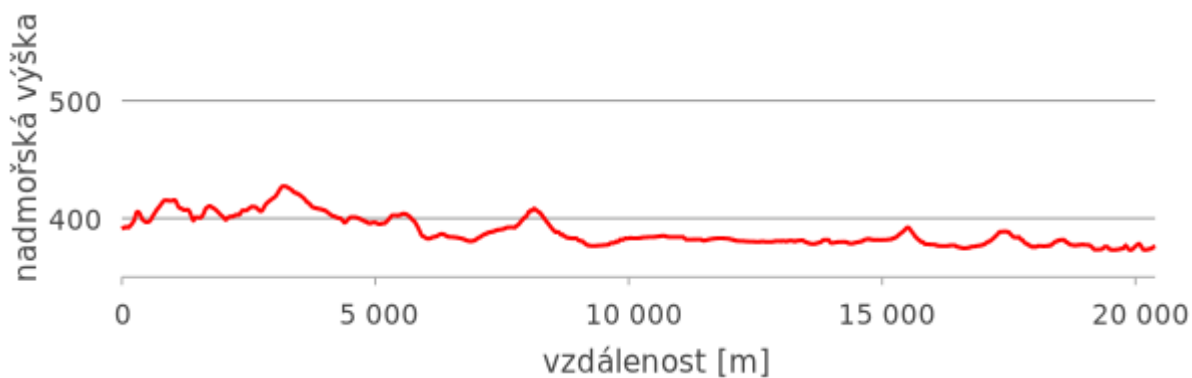
Příloha č. 10: Výškový profil trasy E



Příloha č. 11: Záznam měření trasy F

Jízda	Čas	Platné	Poznámky
1	0:21:48	X	
2	0:21:37	X	
3	0:21:18	X	
4	0:22:02	X	
5	0:20:54		
6	0:22:24		déšť, zdržení ve vesnici
7	0:21:28	X	déšť

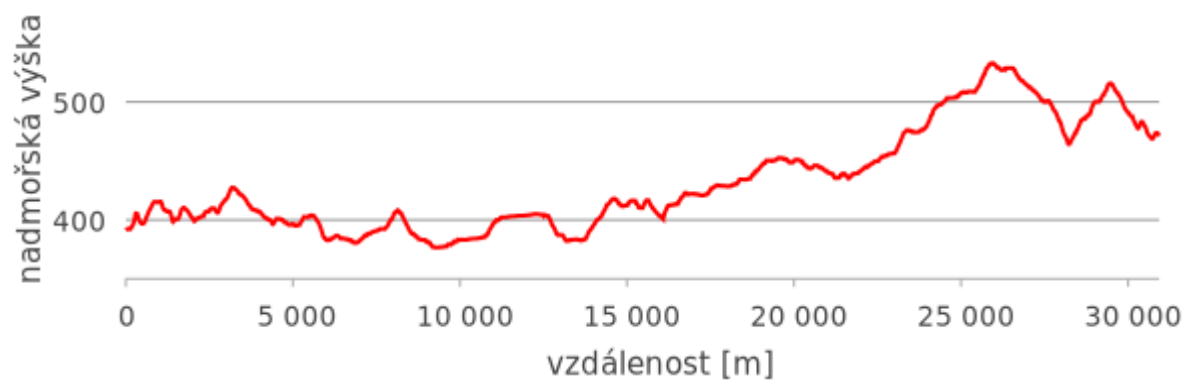
Příloha č. 12: Výškový profil trasy F



Příloha č. 13: Záznam měření trasy G

Jízda	Čas	Platné	Poznámky
1	0:30:12	X	
2	0:29:40	X	
3	0:30:01	X	zdržení na křižovatce
4	0:30:43		
5	0:29:32	X	
6	0:29:15		

Příloha č. 14: Výškový profil trasy G



Příloha č. 15: Záznam měření trasy H – směr nahoru

Jízda	Minuty	Sekundy	Setiny	Čas	Platné	Poznámky
1	3	10	55	3.176	X	
2	3	9	32	3.155	X	
3	3	12	16	3.203	X	
4	3	1	30	3.022	X	
5	3	14	0	3.233	X	
6	3	22	60	3.377		
7	3	17	17	3.286	X	
8	3	6	32	3.105	X	
9	2	58	20	2.970		
10	3	18	1	3.300		
11	3	15	37	3.256	X	
12	3	13	48	3.225	X	
13	2	59	61	2.994	X	
14	3	8	91	3.149	X	
15	2	57	24	2.954		
16	3	4	97	3.083	X	
17	3	25	33	3.422		
18	3	17	18	3.286	X	
19	3	5	13	3.086	X	
20	3	11	63	3.194	X	
21	3	6	29	3.105	X	
22	2	52	35	2.873		
23	3	3	23	3.054	X	
24	3	12	31	3.205	X	
25	3	4	20	3.070	X	
26	3	7	1	3.117	X	
27	3	13	12	3.219	X	
28	3	10	54	3.176	X	
29	3	4	3	3.067	X	
30	3	7	46	3.124	X	
31	3	3	77	3.063	X	
32	3	8	85	3.148	X	

Príloha č. 16: Záznam měření trasy H – směr dolu

Jízda	Minuty	Sekundy	Setiny	Čas	Platné	Poznámky
1	3	2	31	3.039	X	
2	3	7	46	3.124	X	
3	3	1	7	3.018	X	
4	3	13	24	3.221	X	
5	2	57	7	2.951	X	
6	3	11	2	3.184	X	
7	3	0	19	3.003	X	
8	2	53	94	2.899		
9	3	13	7	3.218	X	
10	3	1	20	3.020	X	
11	3	9	43	3.157	X	
12	3	2	20	3.037	X	
13	3	5	11	3.085	X	
14	3	15	17	3.253	X	
15	3	1	0	3.017	X	
16	3	14	19	3.237	X	
17	2	49	70	2.828		
18	2	56	67	2.945	X	
19	3	12	6	3.201	X	
20	3	18	31	3.305		
21	3	1	30	3.022	X	
22	3	3	4	3.051	X	
23	3	12	11	3.202	X	
24	3	0	94	3.016	X	
25	3	4	21	3.070	X	
26	3	16	44	3.274		
27	2	55	38	2.923	X	
28	3	6	50	3.108	X	
29	3	5	12	3.085	X	
30	3	16	84	3.281		
31	2	50	10	2.835		
32	3	2	54	3.042	X	

Príloha č. 17: Výškový profil trasy H

